

Aerogele

Werkstoffe mit vielfältigem Anwendungspotenzial

L. Ratke

Institut für Materialphysik im Weltraum

51147 Köln

Email: lorenz.ratke@dlr.de



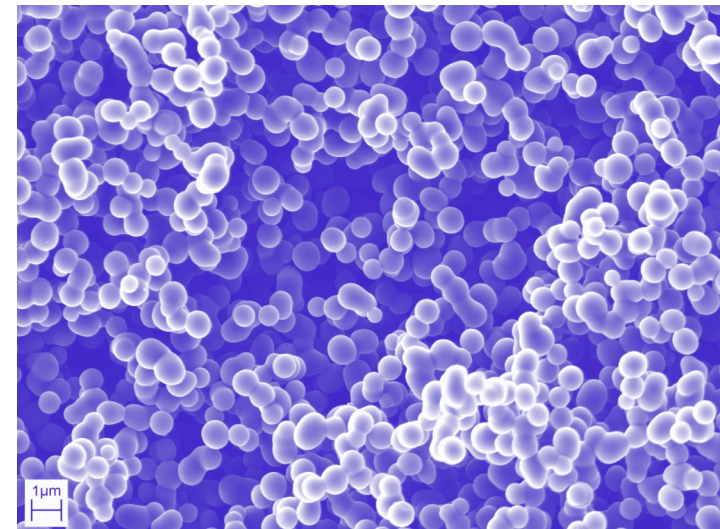
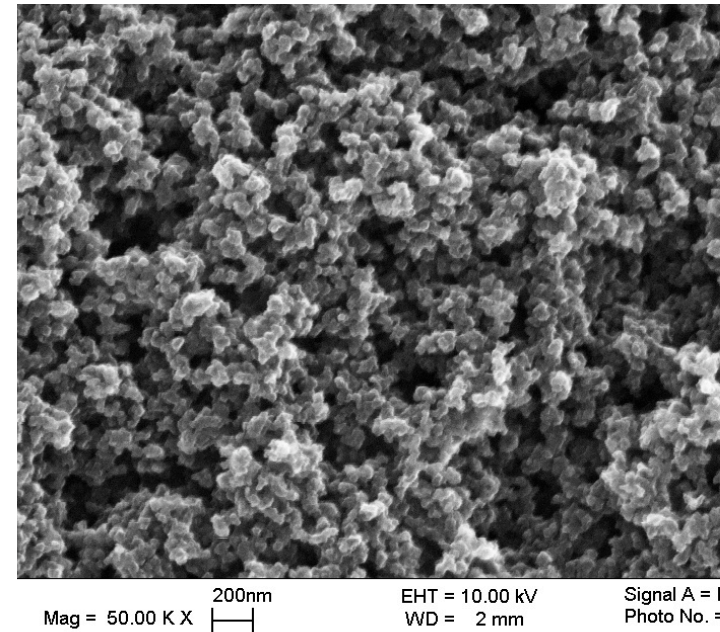
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Was sind Aerogele?

Aerogele sind
nanostrukturierte, offenporige
Festkörper, die über
Sol-Gel Technologie
gewonnen werden

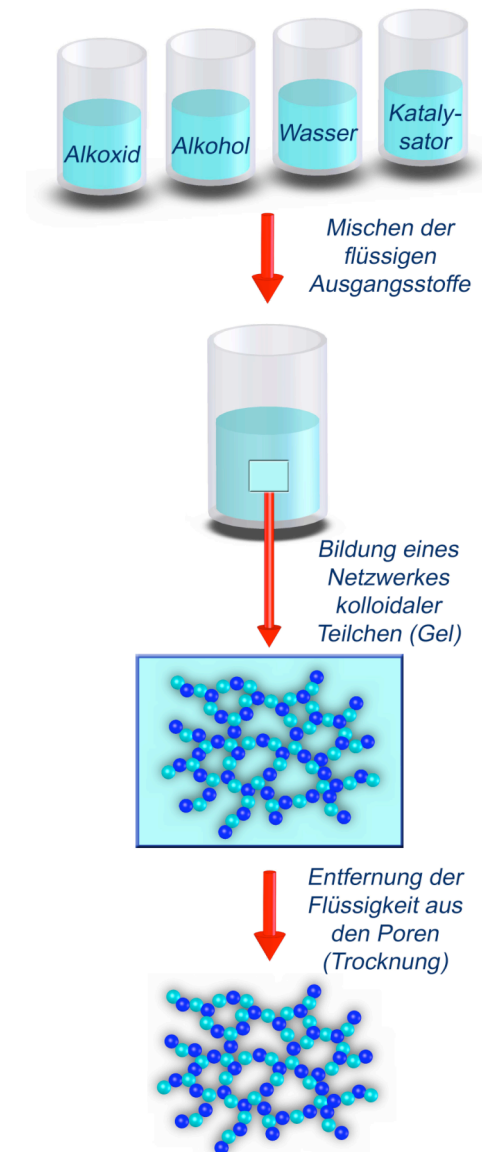
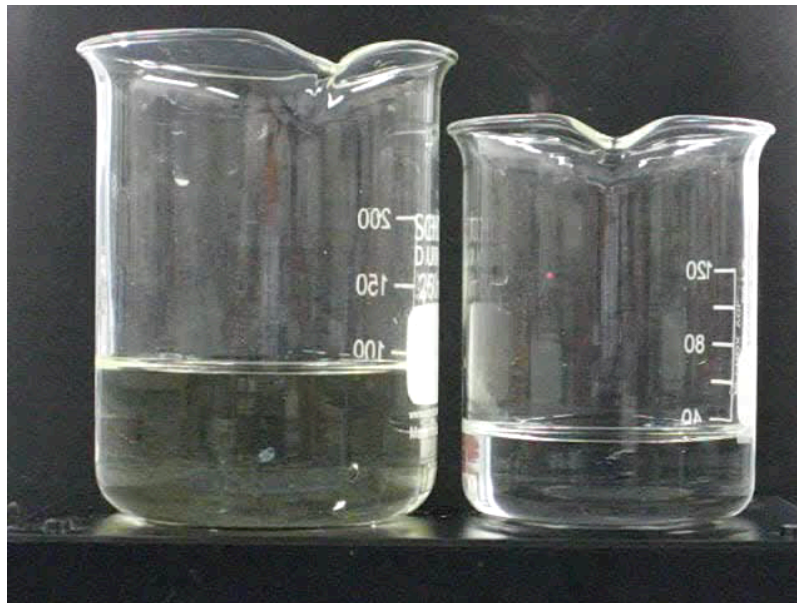
Aerogeltypen

- Oxidische (Quarzglas, Titania, Zirkonia...)
- Polymere (Resorcin-, Melamin-Formaldehyd)
- Kohlenstoff (Pyrolyse der Polymere)
- Zellulose, Stärke
- und nahezu alles was sich gelieren lässt



Herstellung von Aerogelen

- Generelle Technik: Sol-Gel-Prozess =
 - Mischen von Chemikalien
 - Gelieren lassen
 - Trocknen
 - fertig





Herstellung von anorganischen Aerogelen

Stoffe

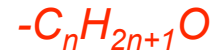
Alkoxide von Metallen oder Metalloiden Al, Fe, Ti, Zr, V, W,... B, Si

Alkyl -group



methyl •CH₃
ethyl •CH₂CH₃
n-propyl •CH₂CH₂CH₃
sec-butyl H₃C(•C)HCH₂CH₃
tert-butyl •C(CH₃)₃

Alkoxy - group



methoxy
ethoxy
n-propoxy
sec-butoxy
tert-butoxy

•OCH₃
•OCH₂CH₃
•OCH₂CH₂CH₃
H₃C(•O)CHCH₂CH₃
•OC(CH₃)₃

Beispiele:

Si(OR)₄ - Tetramethoxysilan TMOS
 - Tetraethoxysilan TEOS
Ti(OEt)₄ - Tetraethylorthotitanat
Al(OR)₃ - Aluminium-sec-oxybutylat

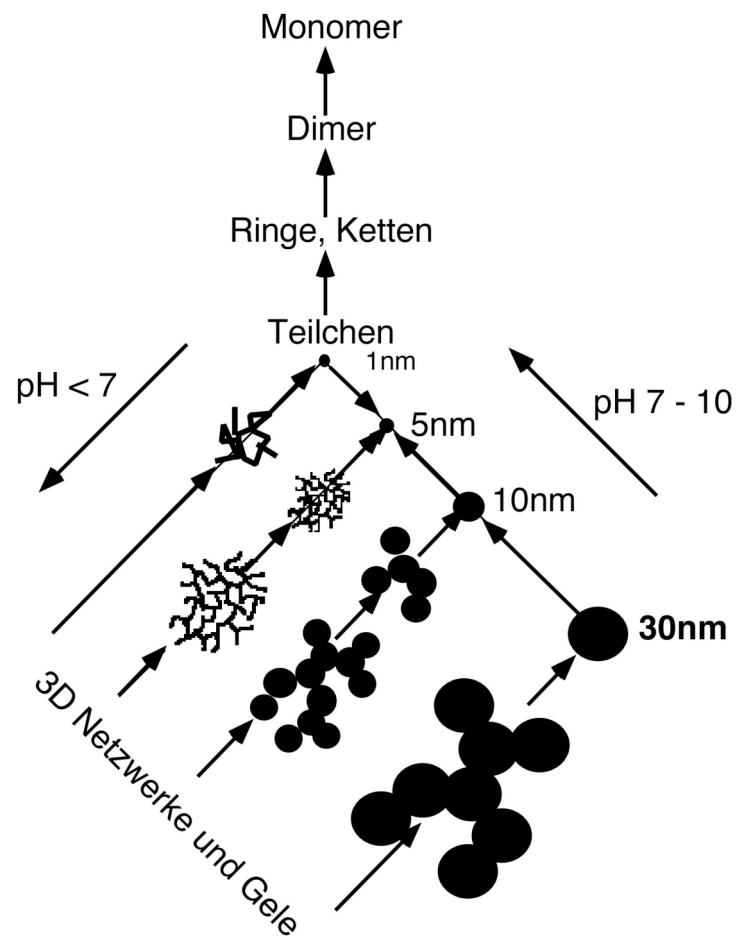
Lösung =
Alkoxyd im zugehörigen Alkohol

Beispiel:
TMOS in Methanol



Herstellung von anorganischen Aerogelen

Hydrolyse + Polykondensation



Kondensation der $\text{Me}-(\text{OH})_n$ Moleküle führt zu

- Erzeugung von Oligomeren und
- Teilchen aus Me-O_n

alcoholic condensation:



condensation by water:



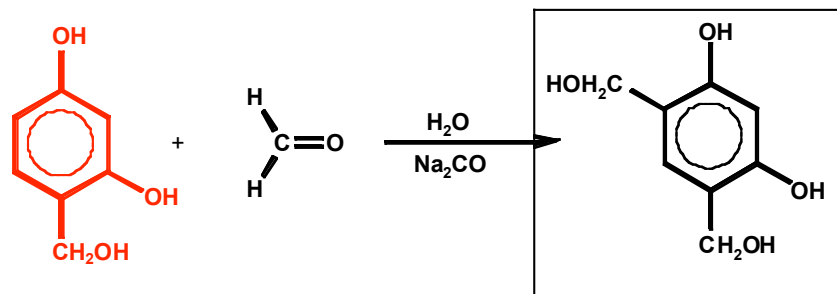
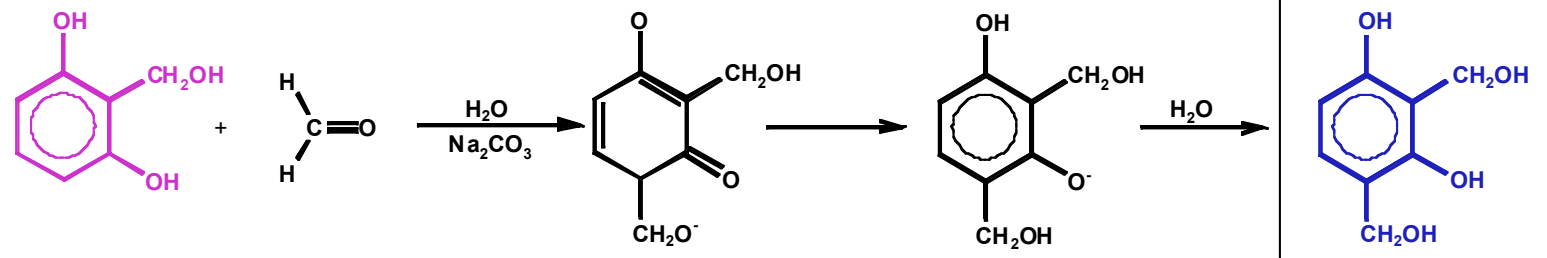
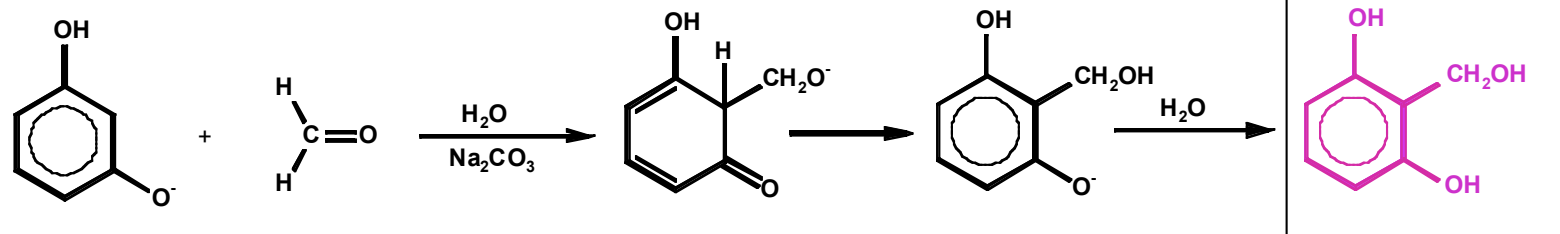
Die Kondensationsrate hängt ab von

- pH-Wert
- Katalysatorkonzentration
- Wasser/Alkoxyd Verhältnis
- Temperatur

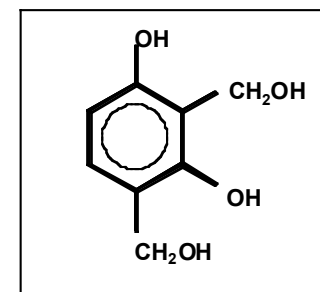
Polymere Aerogele

Lösung: Resorcin und Formaldehyd

Hydrolyse: wie zuvor mit Wasser und einem **Katalysator** wie z.B. (Na_2CO_3)



or

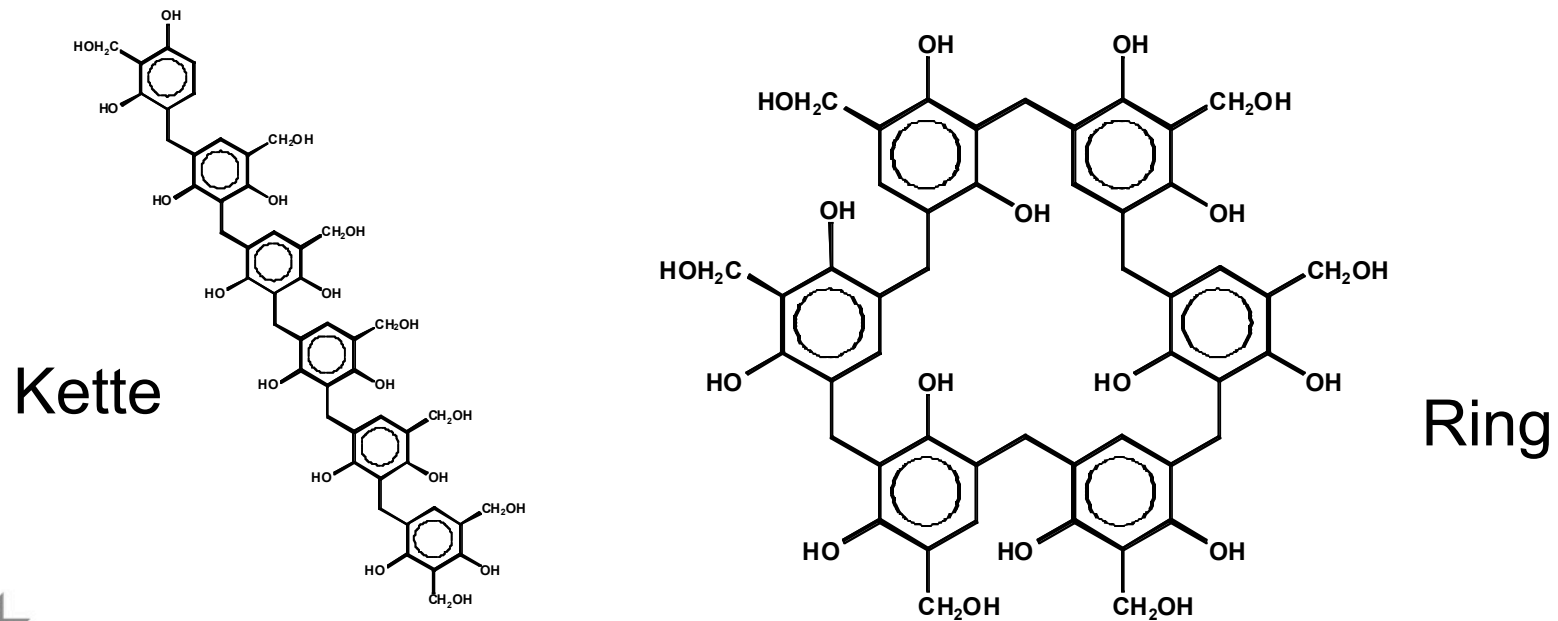
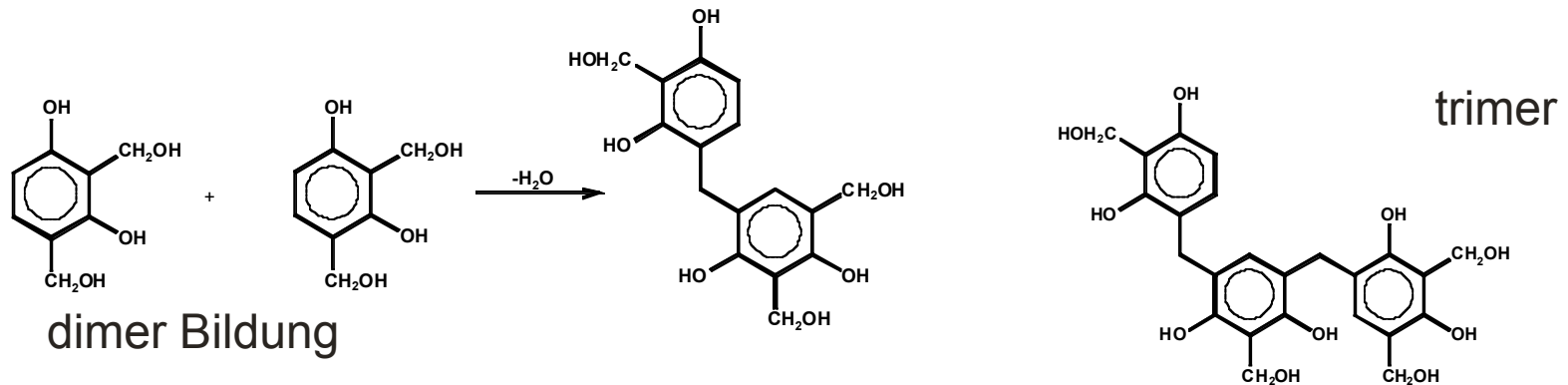


Bildung reaktionsfähiger Monomere



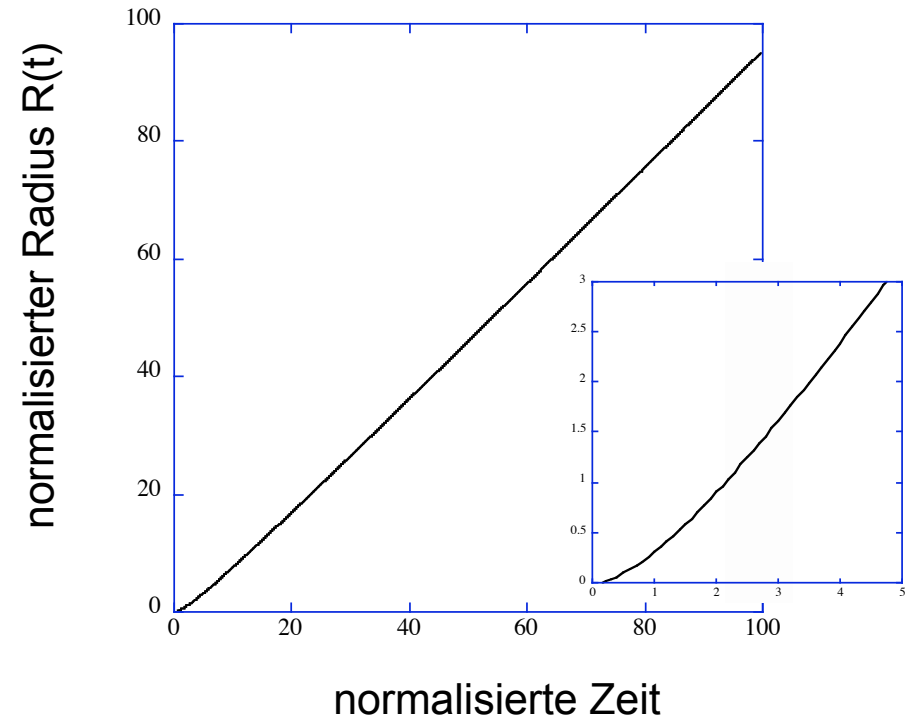
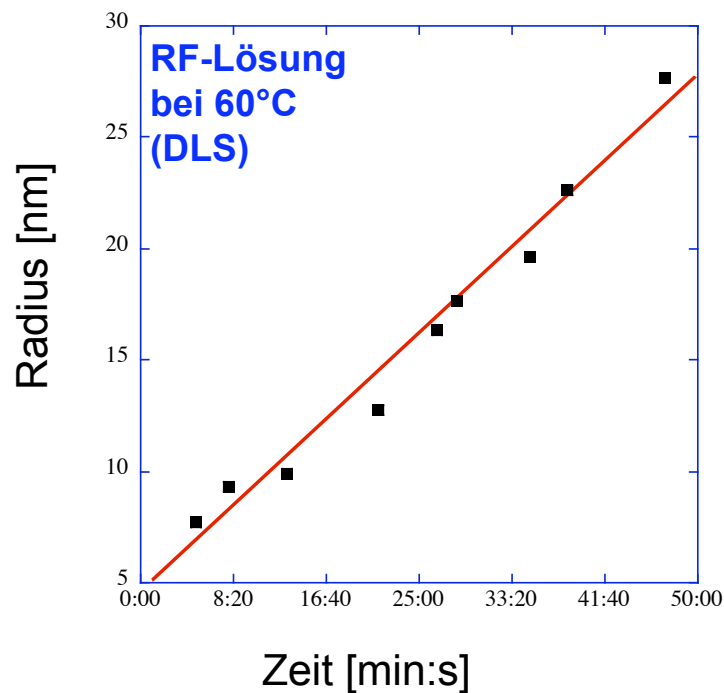
Organische Aerogele

Polykondensation und Gelation



Organische Aerogele

Wachstum der kolloidalen Teilchen



Theoretische Beschreibung:

- Bildung der Monomere durch chemische Reaktion $A+B \rightarrow C (+D)$

führt zu $\frac{dx_c}{dt} = K x_A^2$

- Reaktives Teilchenwachstum : $\frac{dR}{dt} = K_i x_c(t)$

$$R(t) = K_i t - a \ln (1+ b t)$$

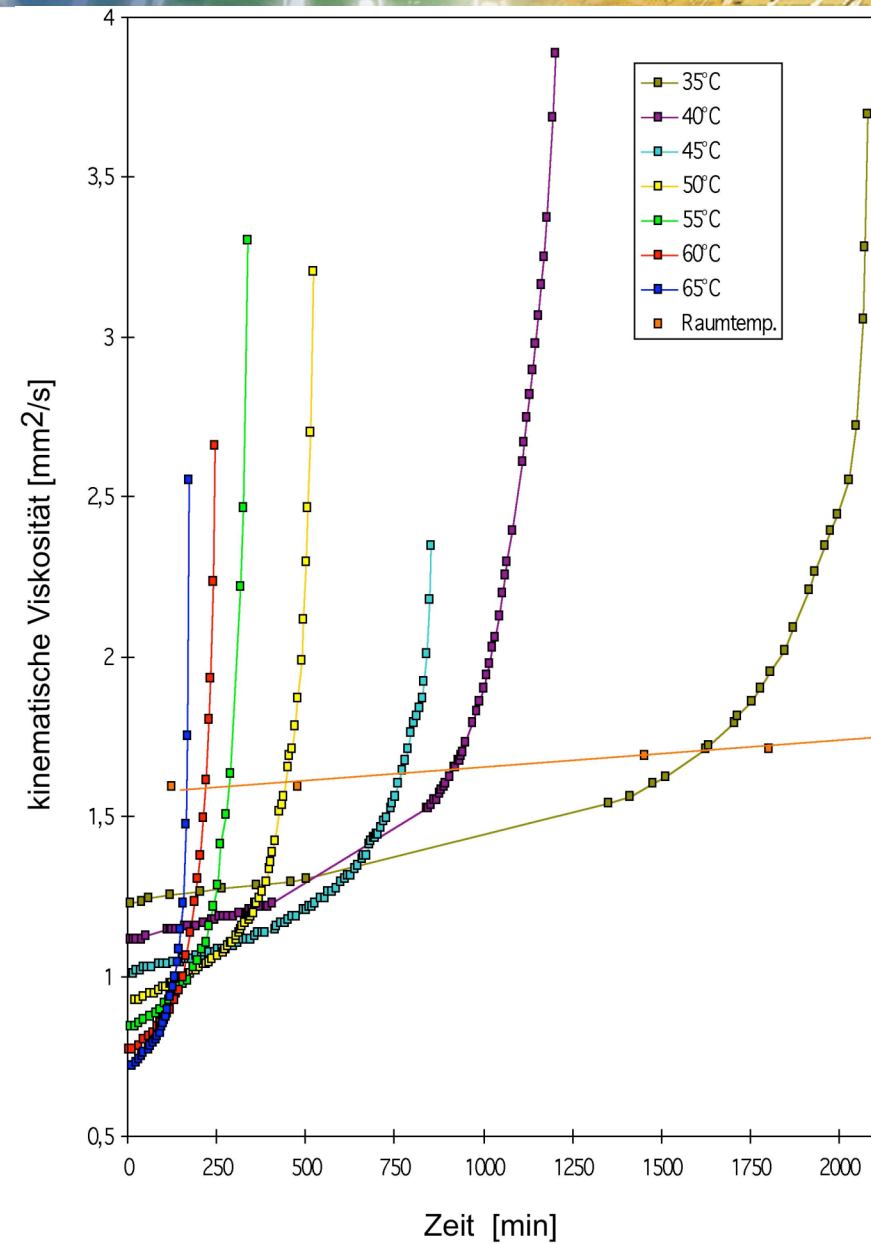
Einflussgrößen: Temperatur

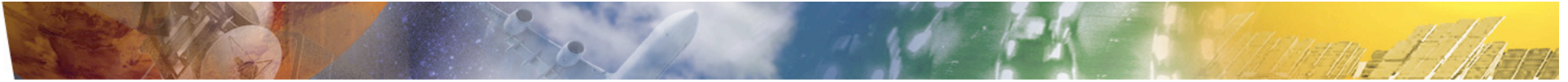
Viskosität eines
RF-sols

(Messmethode:
Ubbelohde
Viskosimeter)

Aktivierungsenergie:

Gelation ≈ 75 kJ/mol





Nasses Gel fertig präpariert und nun?



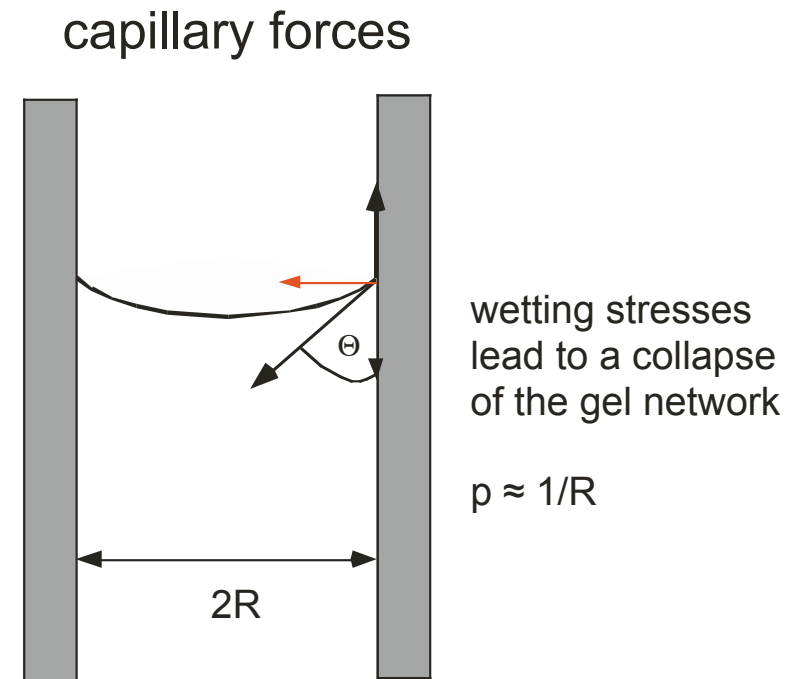
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

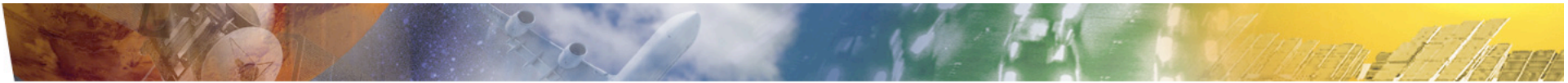
Trocknung - hier entscheidet sich alles!

Methoden: **an Luft** Gefriertrocknung überkritische Trocknung

Lufttrocknung führt zu **Xerogelen**

- Im allgemeinen mit starker Schrumpfung verbunden
- Das feine Porensystem wird durch Kapillarkräfte zerstört
- Porosität zwischen 5 - 50% des massiven Materials
- **Aber:**
Lufttrocknung kann trotz starker Schrumpfung so gesteuert werden, dass perfekte Xerogele entstehen!

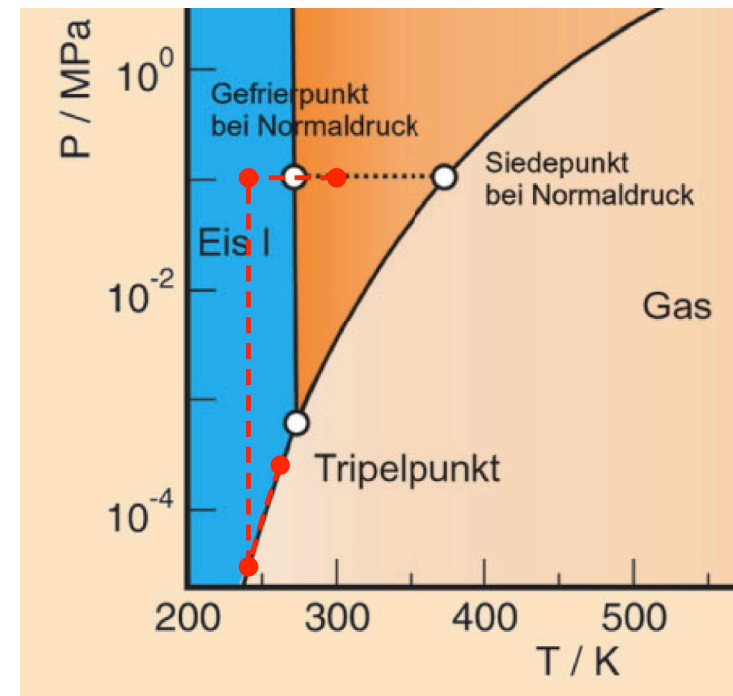




Trocknung - hier entscheidet sich alles!

Methoden: an Luft **Gefriertrocknung** überkritische Trocknung

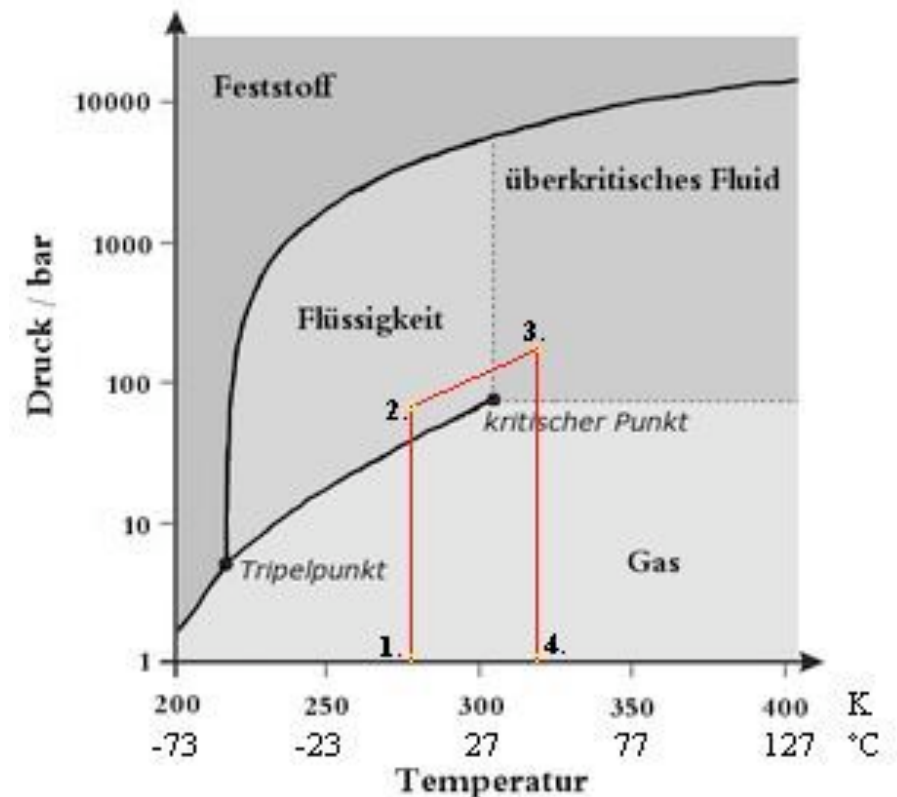
- Gele werden mit Flüssigstickstoff schockgefroren
- Platzieren auf temperierter Stellfläche (-55°C)
- Evakuierung
- Sublimation entlang der Sublimationslinie durch
 - Druckanpassung und
 - Temperaturerhöhung der Stellfläche
- Probenkammer belüften

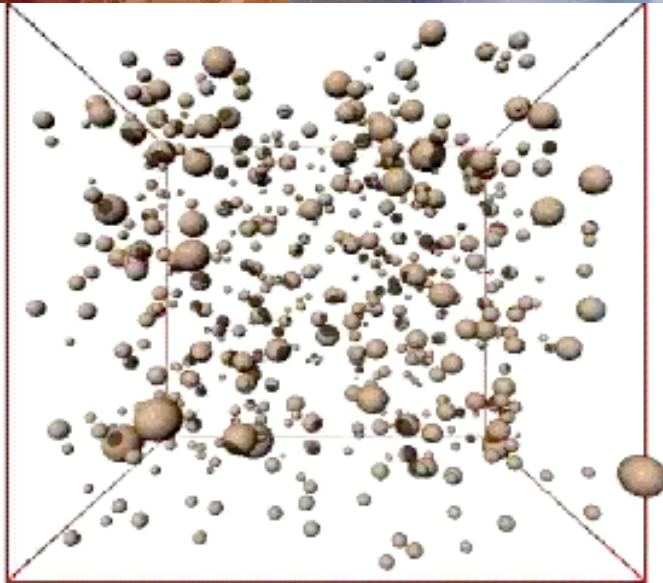
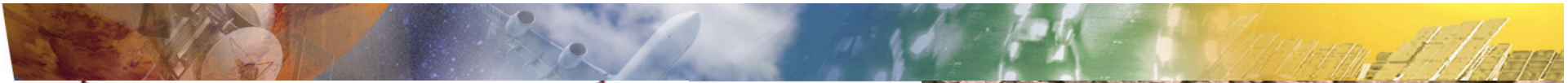


Trocknung - hier entscheidet sich alles!

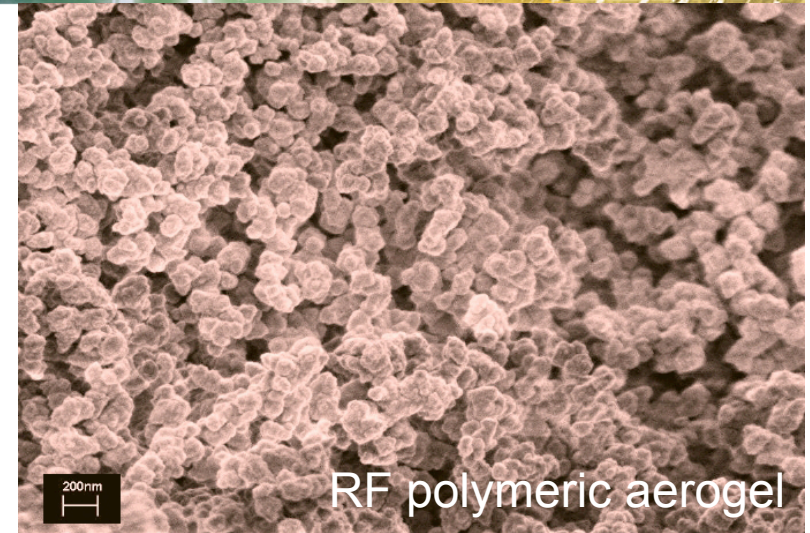
Methoden: an Luft Gefriertrocknung überkritische Trocknung

- Nasse Gele im Autoklaven in einer Wanne mit Ethanol platzieren
- Ethanolaustausch gegen flüssiges Kohlendioxid
- Waschen (Austausch EtOH=>CO₂)
- Temperaturerhöhung über den kritischen Punkt = Ununterscheidbarkeit von Gas und Flüssigkeit = keine Menisken
- T_c=31,1°C, 75 bar.
Realer Prozess = 40 °C mit Druck von 90 bar
- Ablassen des CO₂ auf Normaldruck (langsam (!): Diffusion im Porennetzwerk)



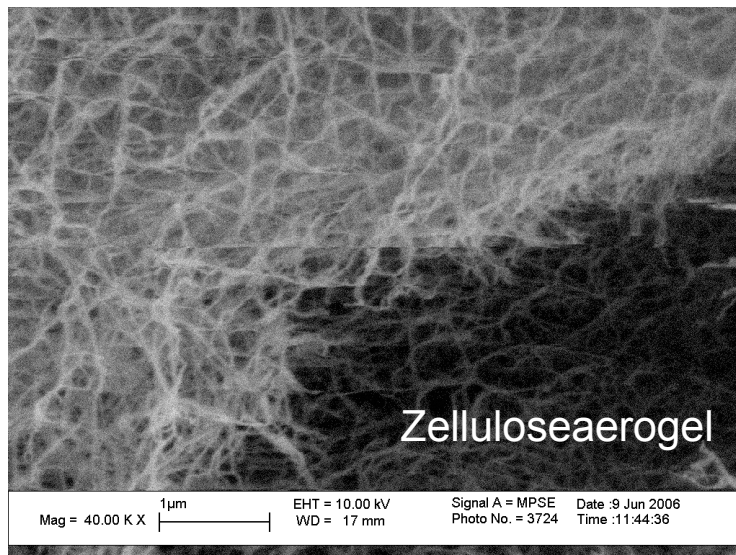


Simulation von B.Halperin , NWU Evanston

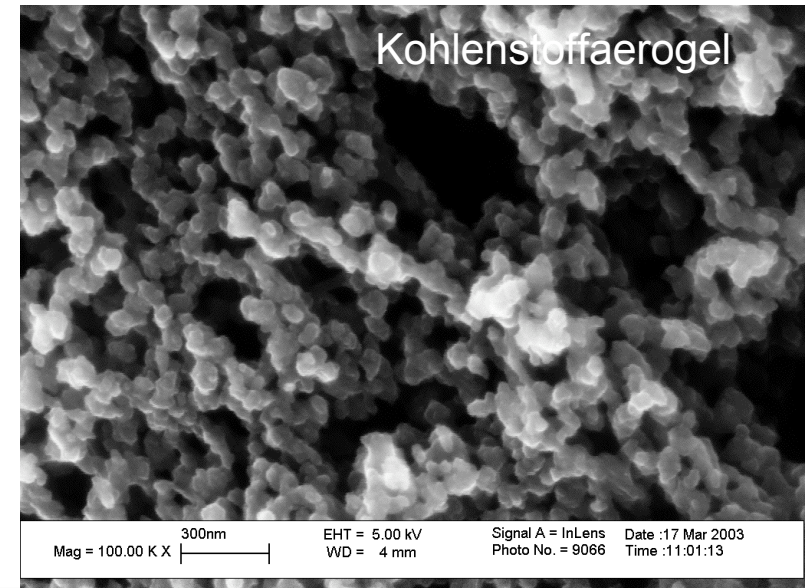


RF polymeric aerogel

Nanostruktur

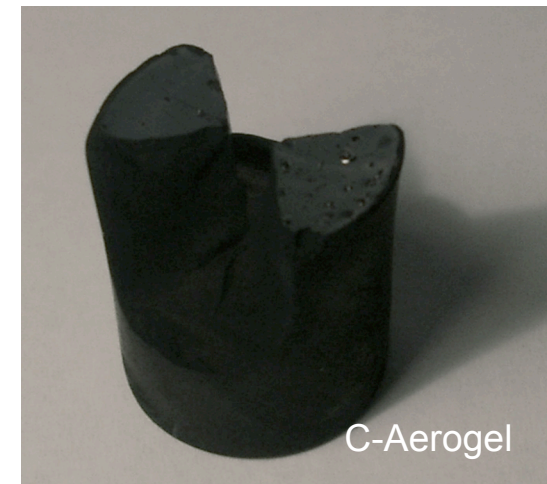
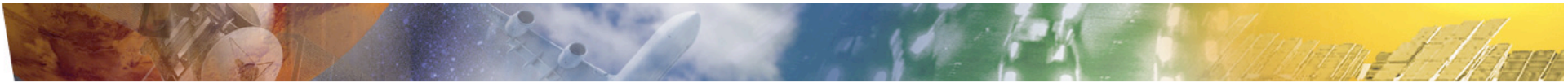


Zelluloseaerogel

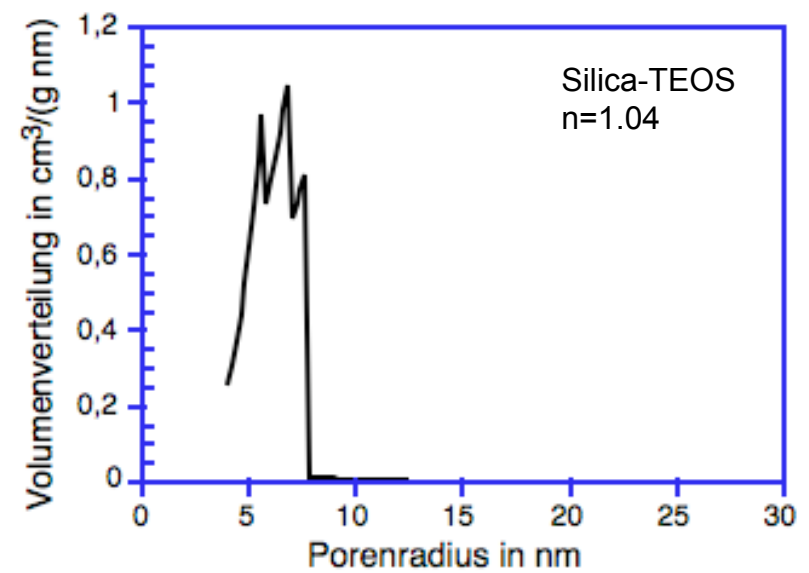
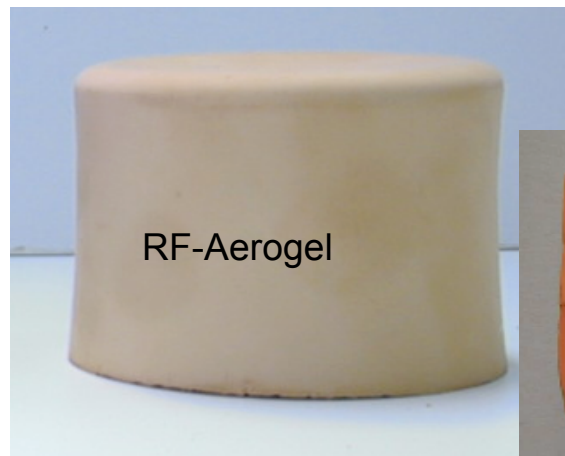


Kohlenstoffaerogel



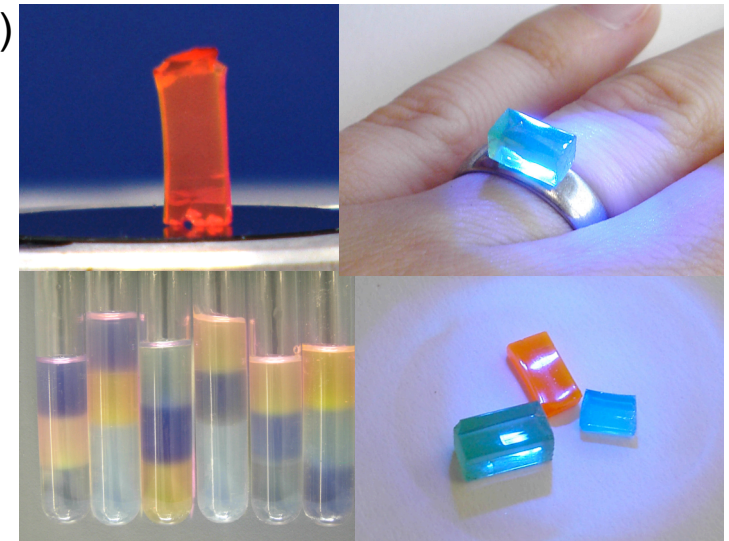
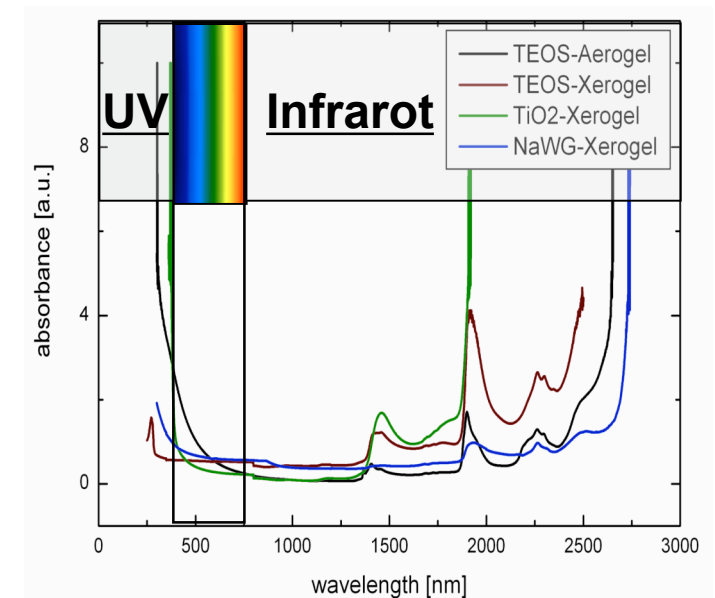


Aussehen und Struktur



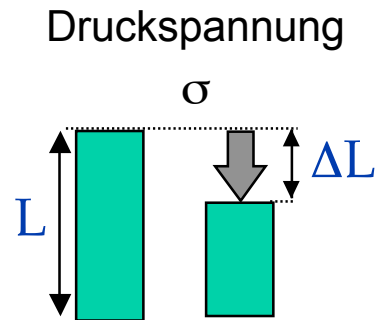
Eigenschaften von Aerogelen

- Geringe Dichten - hohe Porositäten
 - 90 - 99,9 % Porosität
- Hohe Schallabsorption - gering Schallgeschwindigkeit
 - Dämpfung > 50 dB, $v_{\text{schall}} \approx 100$ m/s
- Geringe Wärmeleitfähigkeit
 - 5 - 300 mW/mK
- Transparent oder opak
 - Variabler Brechungsindex (1,001 bis 2,1)
- Keine Reaktion/Benetzung mit Metallschmelzen bis 950°C (Silica und mehr für andere oxidische Aerogele)
- Große innere Oberfläche
 - 10 - 2000 m²/g
- Funktionalisierbare Grenzflächen
 - Chemisch - z.B. hydrophob
 - Physikalisch - z.B. magnetische Schichten
- Funktionalisierbare Gelkörper
 - Einbau von Teilchen mit besonderen Eigenschaften
 - Verbund- oder Hybridgele
 - Gele aus besonderen Materialien (z.B. Ferroelektrika)



Mechanische Eigenschaften von Aerogelen

E-Modul

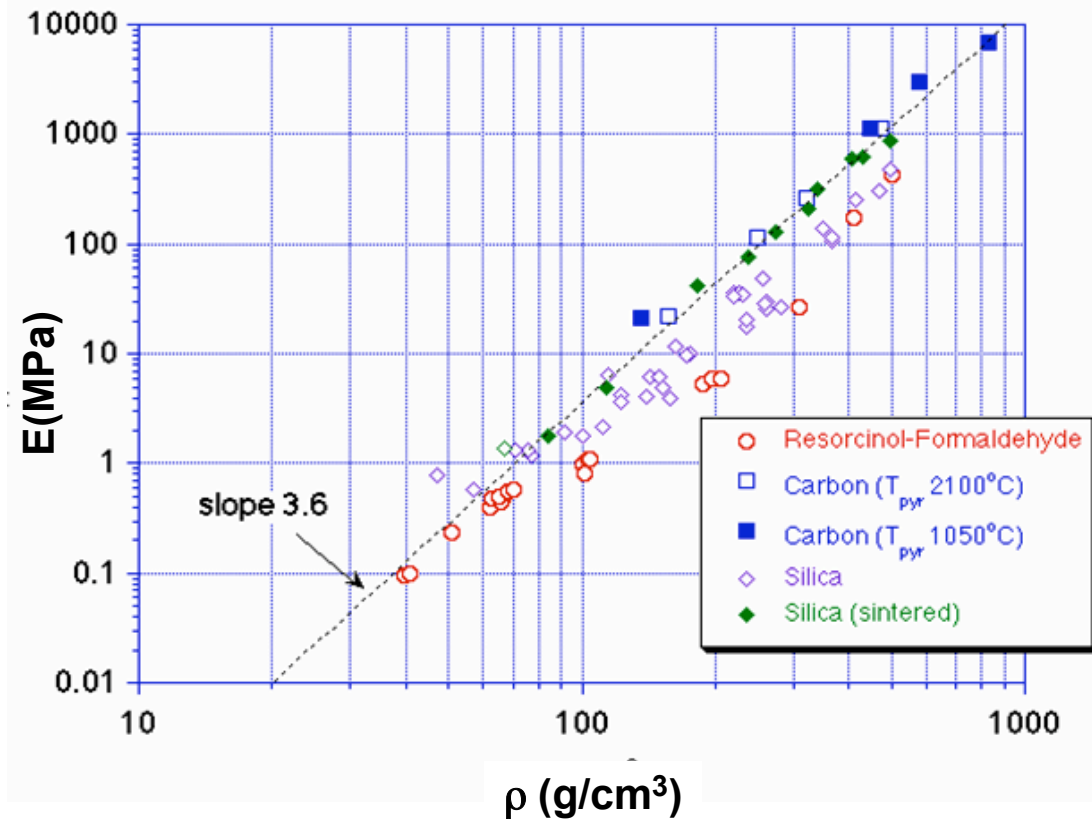


$$\sigma = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot E = \varepsilon \cdot E$$

Festigkeiten (Dichte)

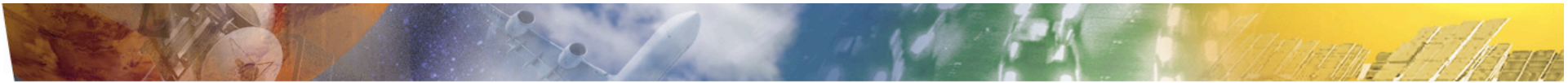
Silica-Aerogel: 20 kPa bis 2 MPa
RF-Aerogele: 100 kPa bis 10 MPa

after Gross et al. JNCS 1992



$$\sigma_B \propto \rho^{1.5}$$

$$E \propto \rho^{3.6}$$



Warum sollte man Aerogele industriell anwenden?

Gründe könnten sein:

- besondere Eigenschaften oder Eigenschaftskombinationen
- Alleinstellungsmerkmale gegenüber anderen Werkstoffen
- besser als andere Werkstoffe
- preiswerter (bei mindestens gleichem Eigenschaftsprofil)
- ...

Unterscheidung treffen

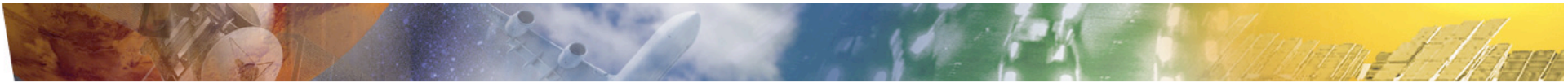
Wissenschaftlich

Was kann man durch Einsatz von Aerogelen untersuchen, was sonst experimentell nicht oder nur schwer zugänglich ist?

Wirtschaftlich

Rohstoffkosten
Herstellungskosten
Verarbeitung & Handhabung
Marktsegment
Konkurrierende Materialien
Preis und Gewinnmarge
Investition
Entwicklungspotenzial
Lieferanten

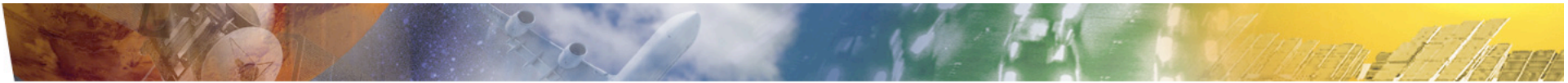




Industrielle Anwendungsfelder

- Thermische Isolation
 - **Hausbau, Fahrzeuge, Pipelines, VIP Panels** (www.americanaerogel.com)
- Elektronische Bauelemente
 - **Kondensatoren, Batterien**, Brennstoffzelle, Weichmagnet
- Filter
 - Schmutzwasser, Metallische Wasserverunreinigungen
- Giessereitechnik
 - **Aerogele Binder, Nano-Additive zu Formstoffen**
- Sensoren
 - **Feuchtesensor**, Geigerzähler, **IR Detektor**
- Architektur
 - **Lichtdiffusoren, Leichtbau-Beton**
- Ultraleichte Konstruktionswerkstoffe
- Frequenzverdopplung
- MEMS Bauteile





Wissenschaftliche Anwendungsfelder

- Phasenübergänge in eingeschränkter Geometrie
 - Erstarrung, Helium-3,...
- **Cerenkov Detektoren**
- **Staubdetektoren oder Staubfänger**
 - Kometenstaub, interplanetaren Staub, Space-Debris
- Isolation
 - Mars-Rover
 - Biolabor-Zellen Spacelab
- **Erstarrungsforschung: Adiabatische Zonen - ARTEMIS**
- **Materialtechnik**

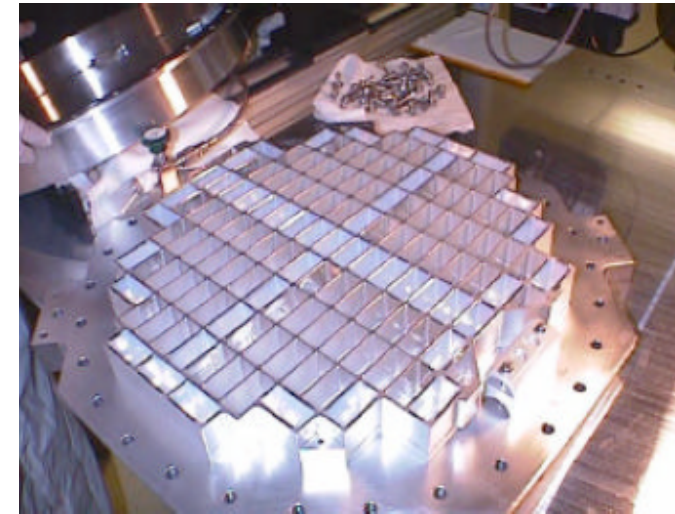


Bild: JPL



Bild: IEHK-RWTH Aachen



Wer macht industriell Aerogele?

Wer liefert was?



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Aerogelgranulate

- **Hersteller:** Cabot (Frankfurt)
 - **Material:** Wasserglas
 - polyedrisch 0.5 - 4 mm oder kugelig
 - Transparent oder opak
 - superhydrophob
 - Kosten \approx 2000 € /cbm



TL - Translucent



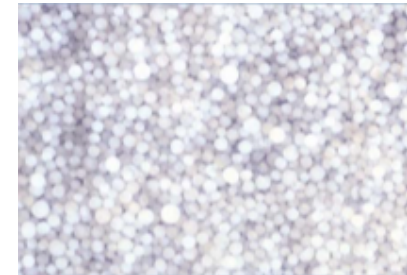
Particle Size Range:	\approx 0.5 to 4.0 mm (0.02 to 0.16 in)
Pore Diameter:	\approx 20 nm
Porosity:	$>$ 90%
Bulk Density:	90 to 100 kg/m ³ (5.6 – 6.2 lb/ft ³)
Surface Chemistry:	Fully Hydrophobic
Thermal Conductivity:	0.018 W/m-K at 25°C (0.125 Btu-in/hr-ft ² -°F)
Surface Area:	600 to 800 m ² /g
CAS RN:	102262-30-6

FP - Fine particles



Particle Size Range:	5 to 15 μ m (0.0002 to 0.0006 in) 5 to 500 μ m (0.0002 to 0.0197 in) 5 to 1200 μ m (0.0002 to 0.0472 in)
Pore Diameter:	\approx 20 nm
Bulk Density:	40 to 100 kg/m ³ (2.5 – 6.2 lb/ft ³)
Surface Chemistry:	Fully Hydrophobic
Thermal Conductivity:	0.018 W/m-K at 25°C (0.125 Btu-in/hr-ft ² -°F)
Surface Area:	600 to 800 m ² /g
CAS RN:	126877-03-0

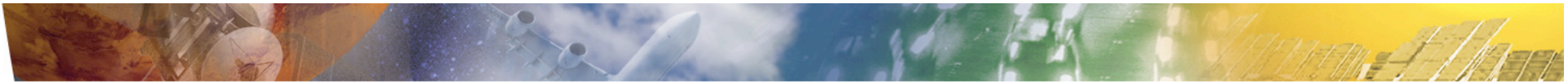
Beads



Particle Size Range:	\approx 1.0 mm (0.04 in)
Pore Diameter:	\approx 20 nm
Porosity:	$>$ 90%
Bulk Density:	90 to 100 kg/m ³ (5.6 – 6.2 lb/ft ³)
Surface Chemistry:	Fully Hydrophobic
Thermal Conductivity:	0.018 W/m-K at 25°C (0.125 Btu-in/hr-ft ² -°F)
CAS RN:	126877-03-0



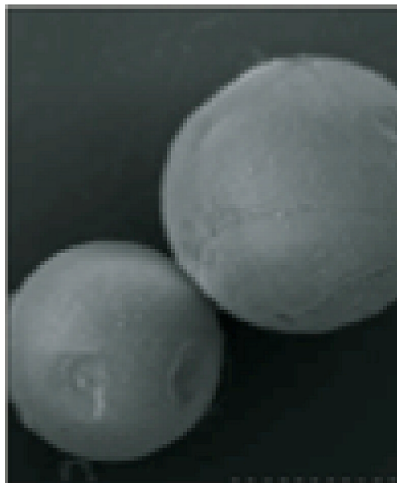
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Aerogelgranulate

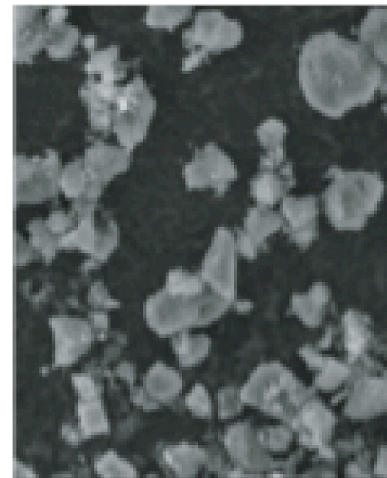
- **Hersteller:** Dow Corning
- **Material:** Quarzglas (Silica-Silylate)
- **superhydrophob**

VM 2260 Beads



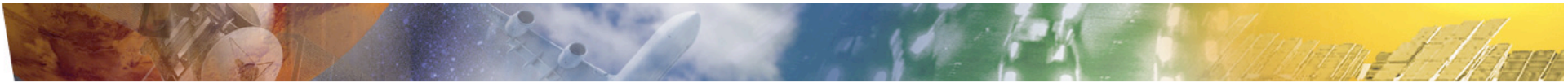
Dichte	90 - 100 kg/cbm
Teilchengröße	1000 μm
Porosität	> 90%

VM 2270 Fine Particles



Dichte	40 - 100 kg/cbm
Teilchengröße	5 - 15 μm
Oberfläche	600 - 800 m^2/g
Porosität	> 90%





Aerogelgranulate

- **Hersteller:** Airglass (Schweden)
- **Material:** Quarzglas (aus TMOS:Methanol)
- **teilhydrophob bis 200°C**
(wird aufgelöst durch Wasser, aber nicht durch Wasserdampf von bis zu 120°C bei ca. 3 bar)



Density	50 - 200 kg/m³
Refractive index	1.02 - 1.05
Heat transfer coeff.	0.021 W/m°C At 20°C(68°F) rising to 0.2 at 300°C(570°F)
Non deforming	up to 750°C(1380°F)
Chemical composition	99.99%SiO2
Standard size today	60 x 60 x 2 cm³ (2 ft x 2 ft x 3/4 inch)
Grain size	10 - 30 nm in diameter

Airglass AB
BOX 150
245 22 Staffanstorp
SWEDEN

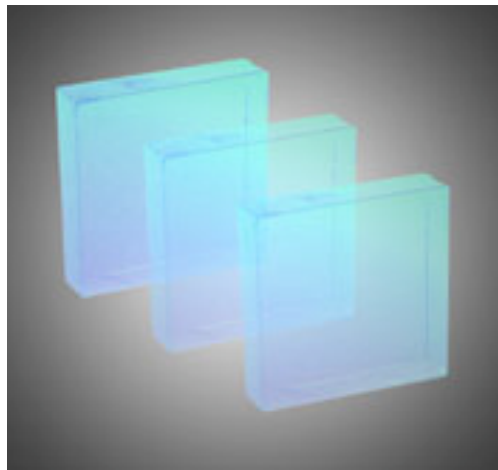
Webseite: www.airglass.se
TEL: +46 46 255200
FAX: +46 46 25692

Preise:

- Platte 20x20x3 cm ≈ 400 €
- Granulat 1 Liter ≈ 150 €
Granulatgröße einstellbar

Aerogelgranulate

- **Hersteller:** MarkeTech (USA)
- **Material:** Quarzglas (aus TEOS:Methanol)
- **teilhydrophob bis 200°C**
(wird aufgelöst durch heisses Wasser,
aber nicht durch Wasserdampf von 120°C)
- **Form:** Bruchstücke, granulierbar
- **Preis:** 100 g = 630 US\$



Marketech International Inc.
107B Louisa Street
Port Townsend, WA 98368
Tel: 360-379-6707
Toll Free: 877-452-4910
Fax: 360-379-6907
info@mkt-intl.com

Properties	Value
Density	0.1 (0.3 - 0.05) g/cm ³
Dielectric Constant	1.14 (18 - 40 GHz)
Surface Area, BET	800 m ² /g
Percent Solids	0.13 - 15%
Mean Pore Diameter	~20 nm
Primary Particle Diameter	2 - 5 nm
Index of Refraction	1.0 - 1.05
Thermal Tolerance	to 500°C
Poisson's Ratio	0.2
Young's Modulus	10 ⁶ - 10 ⁷ Nm ²
Tensile Strength	16 kPa
Fracture Toughness	~0.8 kPa*m ^{1/2}
Compressive Modulus	0.3 MPa
Coefficient of Thermal Expansion (CTE)	2 ppm/C° @20 - 80°C
Electrical Resistivity	10 ¹⁵ ohm-cm
Thermal Conductivity in Air	0.016 W/m/°K
Thermal Conductivity in Vacuum	0.004 W/m/°K
Sound Velocity Through the Medium	100 m/sec
Color	translucent



Aerogelgranulate

- **Hersteller:** Taasi (USA)
- **Material:** Silica-Aerogel
- **Hydrophob/Hydrophil?**
- **Form:** Granulat

Physical Properties of Pristina™ Aerogels*.

Properties	Virgin Aerogel	Fabricated Aerogel
Surface Area, m ² /g	100 - 800	25% less than virgin
Pore Volume, cc/g	0.4 - 2.8	0.9*
Average Pore Radius	3.8 - 100nm & 1-2µm*	10-250nm & 2µm*
Apparent Density, g/cc	0.2 - 0.6	0.4 - 0.6
Crush Strength, Lbf	NA	9 - 14

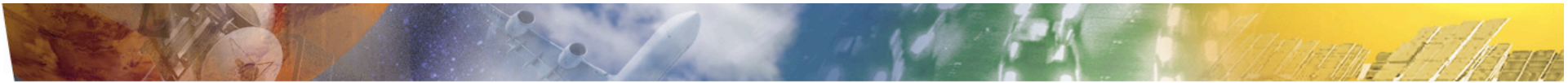


TAASI Corporation
548 West Central Avenue
Delaware, Ohio 43015, USA

Tel: 740-362-3071
Fax: 740-369-1891
y.attia@taasi.com

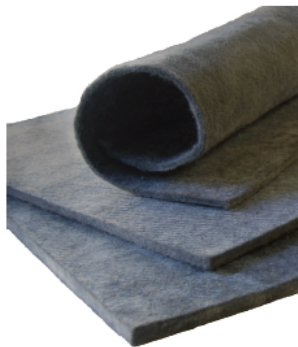


Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Aerogelgewebe

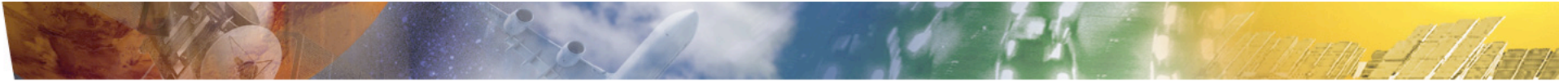
- **Hersteller:** Aspen Systems (USA)
- **Material:** Verbund aus
 - Silica-Aerogel mit Polymerfasern
 - Silica-Aerogel mit Glasfasern
- superhydrophob
- Form: Gewebe



ASPEN AEROGELS, INC.
 30 Forbes Road, Building B
 Northborough, MA 01532
 USA
 Tel: 1.508.691.1111
 Fax: 1.508.691.1200

Product Name	Nominal Thickness		Thermal Conductivity		Density		Maximum Use Temperature	
	mm	in	mW/m-K	Btu-in/hr-ft ² -°F	g/cc	lb/ft ³	°C	°F
Cryogel™ 6000 Data Sheet MSDS-English	6.0	0.24	13.5	0.094	0.13	8.0	40	100
Spaceloft™ 3251 Data Sheet MSDS-English	3.0	0.12	14.0	0.097	0.15	9.4	200	390
Spaceloft™ 6251 Data Sheet MSDS-English	6.0	0.24	14.0	0.097	0.15	9.4	200	390
Spaceloft™ 9251 Data Sheet MSDS-English	9.0	0.36	14.0	0.097	0.15	9.4	200	390
Spaceloft™ 6250 Data Sheet MSDS-English	6.0	0.24	12.5	0.087	0.13	8.0	200	390
Pyrogel® 2250 Data Sheet MSDS-English MSDS-French MSDS-Italian	2.0	0.08	15.5	0.107	0.17	10.7	250	480
Pyrogel® 6250 Data Sheet MSDS-English MSDS-French MSDS-Italian	6.0	0.24	15.5	0.107	0.17	10.7	250	480
Pyrogel® 6350 Data Sheet MSDS-English MSDS-French MSDS-Italian	6.0	0.24	15.5	0.107	0.17	10.7	350	660

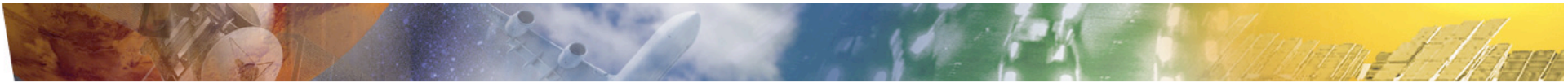




Beispiel für Anwendungen



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

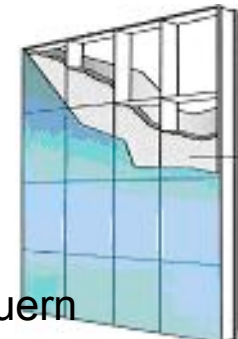


Fenster - Lichtdiffusoren

Grundlage: Aerogele streuen Licht, insbesondere kurzwelliges

Technik: Füllen von Stegplatten mit Aerogelgranulat.

Hersteller: Cabot (Markenname: Nanogel) in Kooperation mit Fensterbauern



Wirkungen:

a) Diffuse Lichtverteilung im Raum

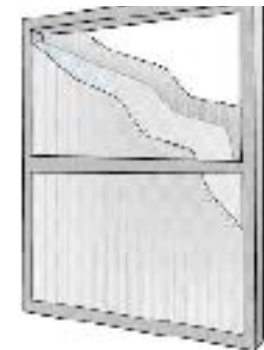
b) Wärmeisolation



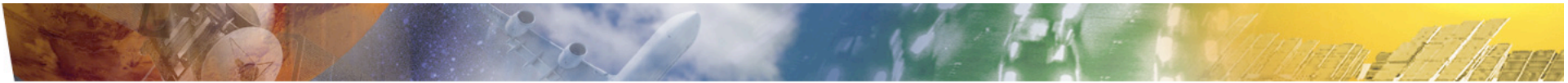
Single pane glass	4.70-5.70
Double pane glass	2.70-2.90
Double pane insulated glass 14mm Argon low E	1.80
Double pane insulated glass Argon low E	1.20-1.40
Triple pane 2x12mm Crypton, 2x low E	0.80
Double pane glass 30mm + Nanogel	0.60
Profilit	2.84
Profilit + Nanogel in 16mm PC	1.81
Profilit + Nanogel in 25mm PC	1.60
Profilit low E	1.75
Profilit low E + Nanogel in 16mm PC	1.30
Profilit low E + Nanogel in 25mm PC	1.10
Polycarbonate 16mm	2.40
Polycarbonate 25mm	1.50
Polycarbonate 16mm + Nanogel	1.31
Polycarbonate 25mm + Nanogel	0.89

U-Werte

U = Wärmeleitfähigkeit/Dicke



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Fenster - Lichtdiffusoren - Wirkung

➤ vorher



➤ nachher



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

<http://www.milttyr.se/nanogel.html>

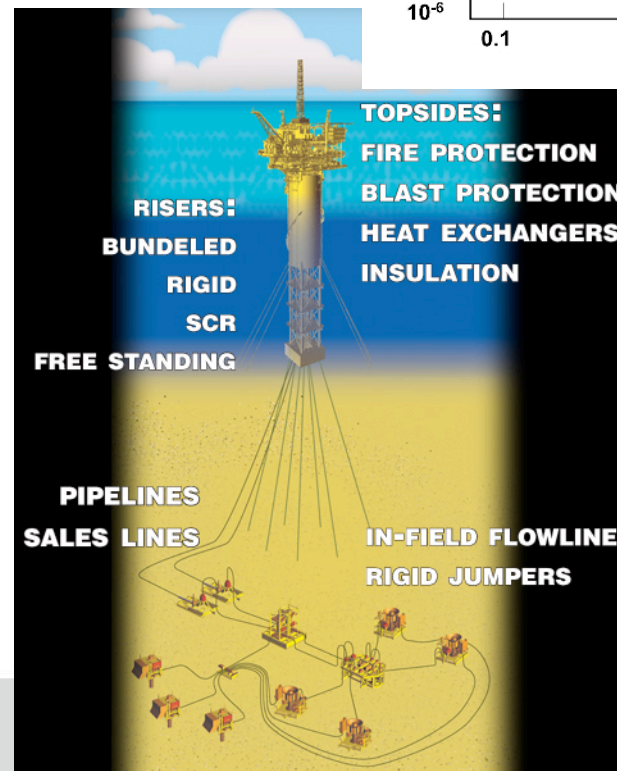
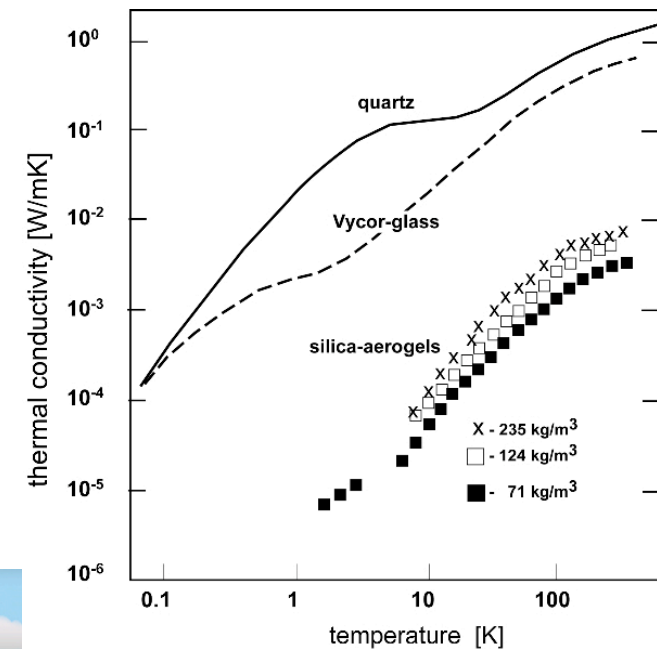
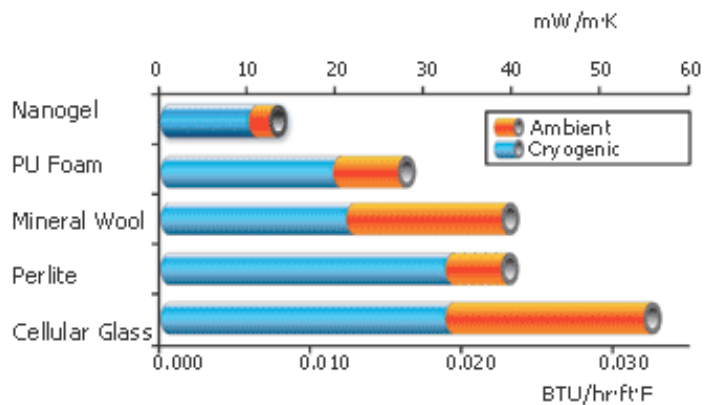
Isolation von Pipelines

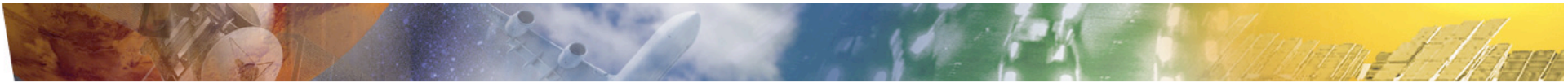
Grundlage:

geringe Wärmeleitfähigkeit von Aerogelen

Herausforderungen:

- mechanische Belastung (hydrostatischer Druck; Tiefsee)
- Hohe Temperatur der Rohöle (Abkühlung=Verstopfen)
- Hohe Lebensdauer
- Lange Transportwege (geringe Wärmeverluste)





Isolation von Pipelines - Lösungen

Anbieter:

- Cabot
- Aspensystems



Technische Lösung ist unterschiedlich.

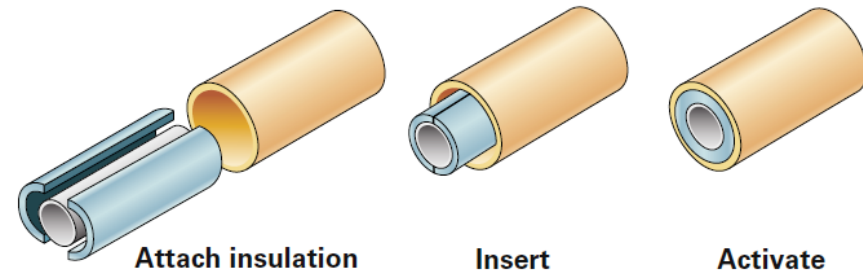
Cabot: Compression/Expansion-Pack

Aspen: Aerogelfasermatten (wie Steinwolle)

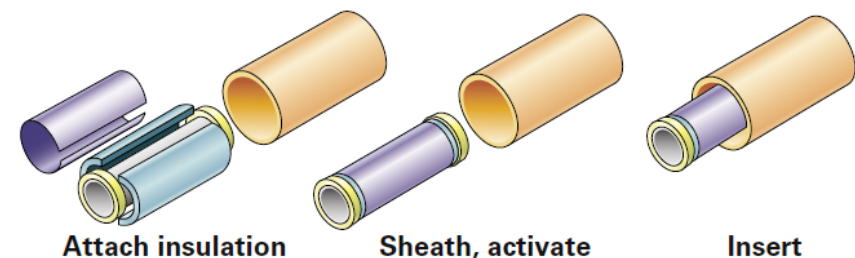
Compression/Expansion-Pack-Technik:

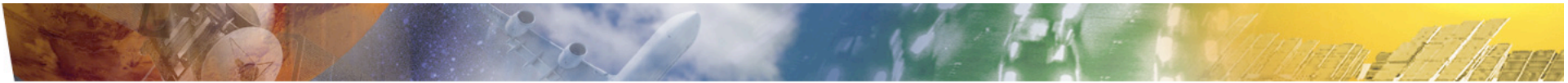
- Aerogelteilchen unter Vakuum komprimiert und dabei geformt.
- Halbschalen um inneres Rohr legen, das äußere Rohr darüber geschoben und die Vakuumverpackung geöffnet.
Expansion des elastisch komprimierten Aerogels führt zu formstabiler Ausfüllung des Hohlraums.
- Compression: Aerogelteilchen in Hüllen mit festem Einband um Pipeline komprimiert gewickelt.

EXPANSION PACK INSTALLATION



COMPRESSION PACK INSTALLATION





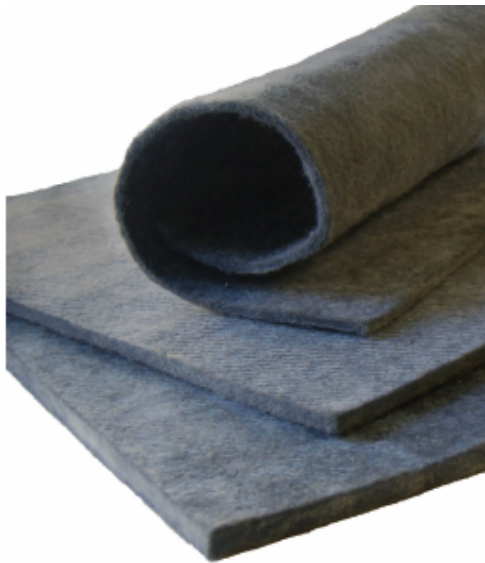
Isolation von Pipelines - Lösungen

Anbieter:

- Aspensystems
- Cabot

Aspenlösung

**Fasermatten = Silica-Aerogelbeschichtete
Glas- oder Polymerfasern**




COMPARE THE ASPEN AEROGELS SOLUTION

STEEL SAVINGS BENEFIT:

SAVINGS	ENGLISH	METRIC
RISER WEIGHT DELTA	219,755 LBS	99,662 KG
FLOWLINE WEIGHT DELTA	6,010,631 LBS	2,726,000 KG

FLOWLINE ASSUMPTIONS:

	ENGLISH	METRIC
SIZE	8.625" X 0.625 W	219.1 M X 15.9 W
U-VALUE / OHTC	.106 BTU/SQ FT HRSF	0.6 W/M² K
WATER DEPTH	3000 FEET	914 METERS
FLOWLINE LENGTH	82020 FT / 15.5 MILES	25,000 METERS / 25 KM

RESULTS:

	ASPEN AEROGELS	PUF
CARRIER OUTER DIAMETER	12.750	18.000
CARRIER WALL THICKNESS	.500 WALL*	.750 WALL*
INSULATION MATERIAL	AEROGEL SPACELOFT™ 6250	POLYURETHANE FOAM
INSULATION THICKNESS	25 MM OR 1 INCH	102.4 MM OR 4.03"
DRY WEIGHT OF ASSEMBLY	178.94 KG/M, OR 120.26 LBS/FT	287.98 KG/M, OR 193.5 LBS/FT
DRY WEIGHT OF RISER	163,551 KG OR 360,630 LBS	263,213 KG OR 580,385 LBS
TOTAL STEEL WEIGHT	4,473,500 KG, OR 9,864,067 LBS	263,213 KG, OR 15,874,898 LBS

* Hydrostatic Water Column requires larger wall thickness for larger O.D. pipe. Structural engineering during lay operations is not taken into account.

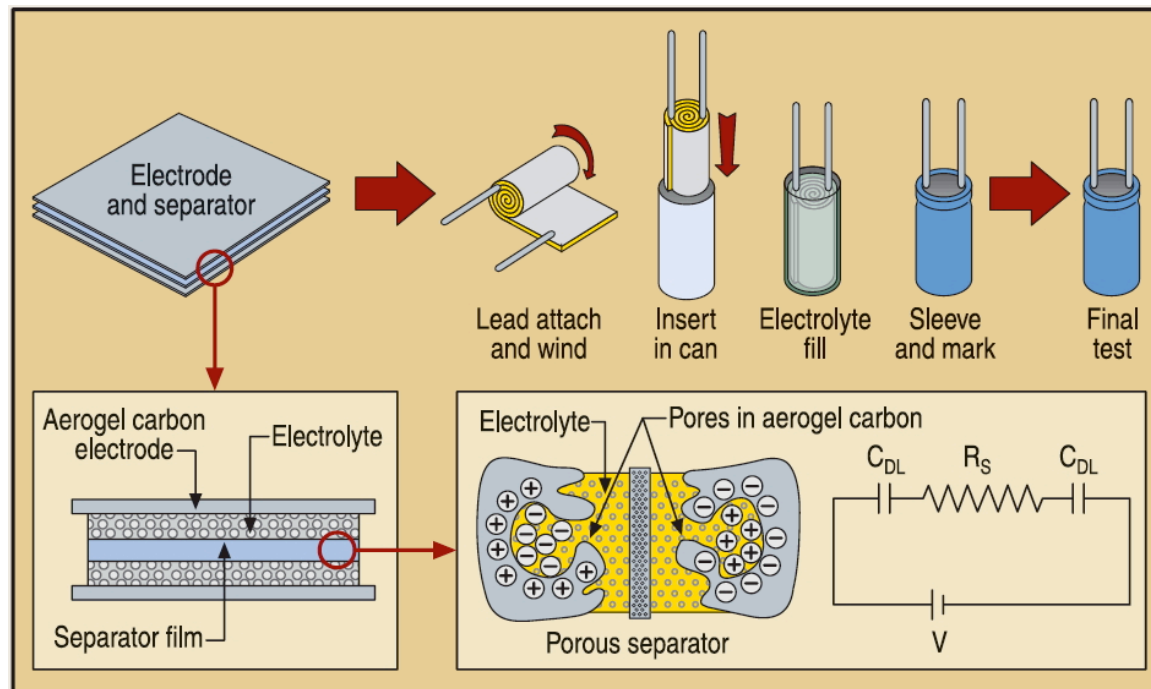


Elektronische Bauelemente - Kondensatoren/Batterien

Grundidee: Ausnutzung der inneren Oberfläche von Aerogelen

Kapazität ist proportional zur Fläche!

Basismaterial: Kohlenstoffaerogele als dünne Filme



Spezifische Werte
100 - 300 Farad/g

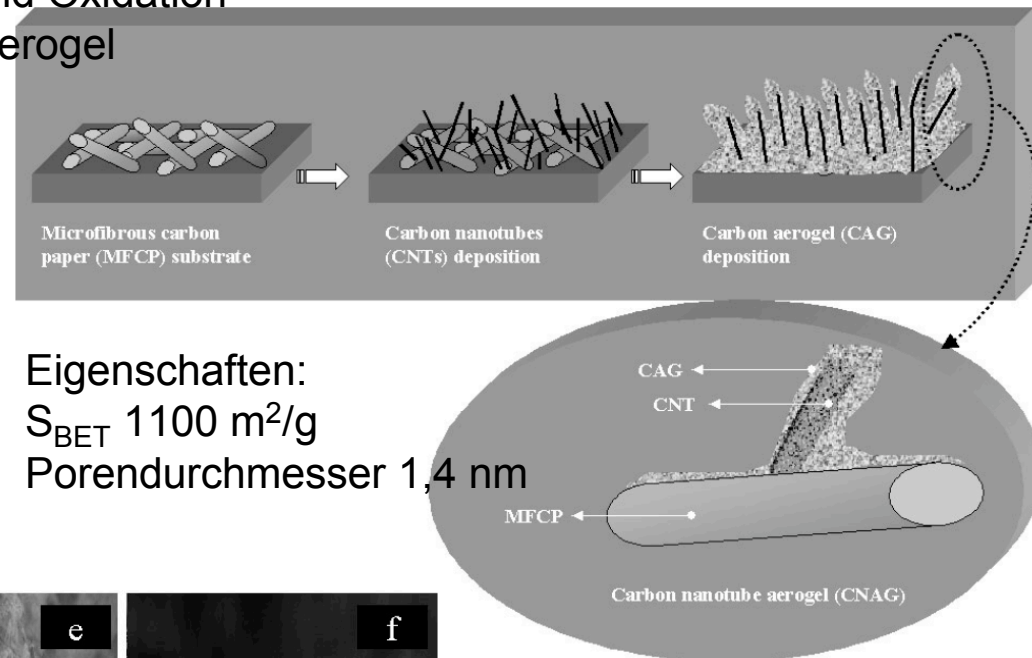
Elektronische Bauelemente - Kondensatoren/Batterien

Neuere Entwicklungen:

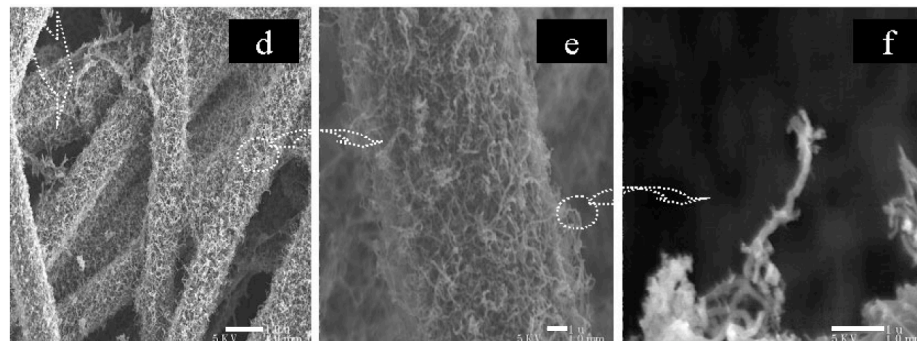
- a) Beladung der C-Aerogele mit Ru und Oxidation
- b) Verbund aus C-Nanotubes und C-Aerogel

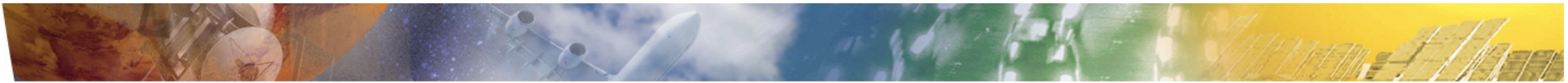
Bordjiba, Adv.Mat. 20 (2008) 815-819

Kapazität bis zu 520 F/g
Höhere Werte bis zu 750 F/g
werden berichtet
Höhere Stromdichten als reine
Kohlenstoffaerogele



Eigenschaften:
 S_{BET} 1100 m²/g
Porendurchmesser 1,4 nm



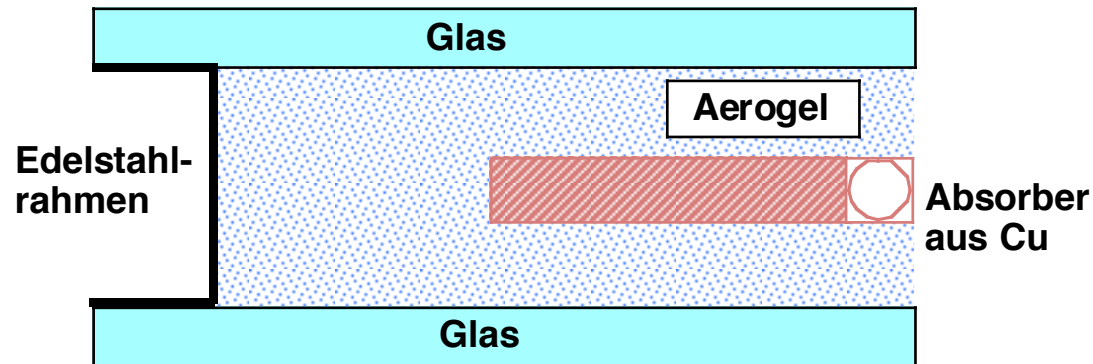


Hausbau: Solarkollektoren

Ziel: Erhöhung des Wirkungsgrades von Sonnenenergiekollektoren

Idee: Ausnutzung der geringen Wärmeleitfähigkeit von Aerogelen (evakuiert)

Aufbau:



Testkollektoren mit monolithischem Aerogel 0,5 x 0,5 m, 2cm dick
Dichte: 200 kg/m³ und Wärmeleitfähigkeit 8 mW/Km

Ziel:

Erzeugung von Brauchwasser zwischen 60 und 80°C

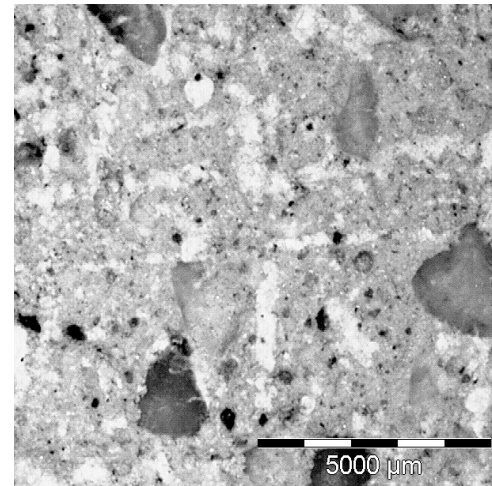
Ergebnis:

Minimal notwendige Wärmeeinstrahlung: 90 W/m²

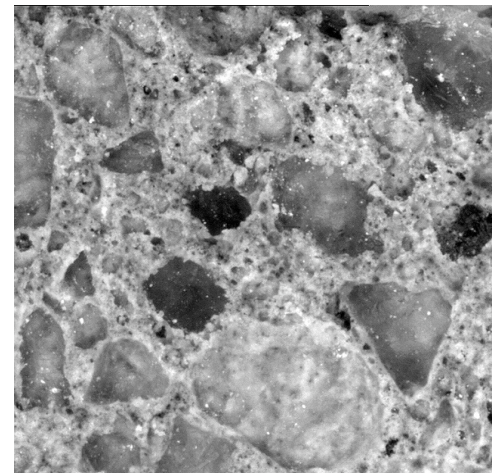
Verglichen mit Standardkollektoren: 240 W/m².

Hausbau: Aerogelbeton

- Verbundwerkstoff aus
 - hydrophobem Aerogelgranulat und
 - anorganischem Binder/Matrix
- Binder- bzw. Matrixmaterialien
 - Gips oder Gipsputz
 - Zement oder Zementputz
- Herausforderungen
 - Dichteunterschied Aerogel zu Binder
 - Haftfestigkeit im Binder



Aerogelgranulat
Goldband™



Aerogelgranulat
Zement



Herstellung von Aerogelbeton

➤ Mischungen von

➤ Baugips, Gipsputz (Rotband, Goldband), Feingips, Perlgips,

➤ Aerogelgranulat

➤ Dispergiermittel

➤ Zement

➤ Portlandzement und Portlandhüttenzement

➤ Aerogelgranulat

➤ Dispergiermittel



➤ Anteile Aerogelgranulat: 40 bis 80 Volumenprozent

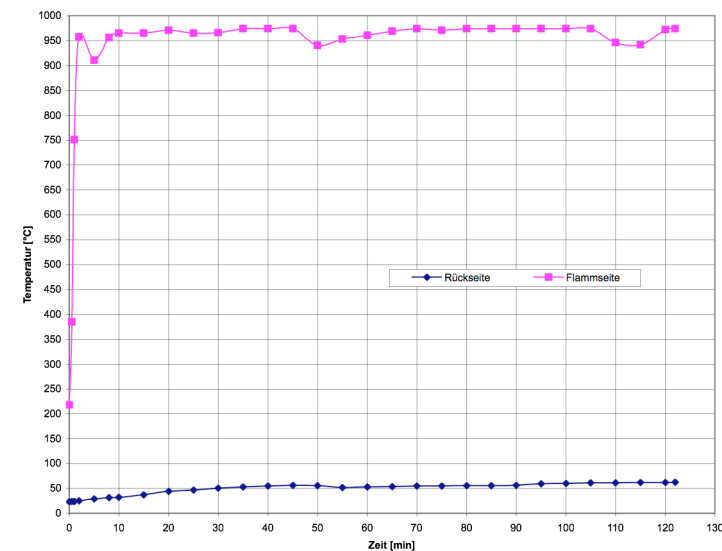
➤ Mischmethode:

handelsübliche Rührer, aber in der richtigen Reihenfolge, richtige Dosierung...



Eigenschaftsspektrum von Aerogelbetonen

- Dichte 250 kg/m³ bis 1000 kg/m³
- Brandschutzklasse besser als F120
- Schalldämmung besser als 40 dB (ab 6 cm)
- Geringe Wasserdurchlässigkeit
- Druckfestigkeit 1 – 2 MPa
- Biegefestigkeit <0,5 MPa
- Verklebbarer Werkstoff
- Haftgrunde auftragbar
- Befestigungselemente (Dübel) anbringbar
- Aerogelbetone lassen sich
 - sägen, schleifen, bohren, raspeln,...
 - bewehren mit Geweben und Stählen



Feuchtesensoren

Grundidee:

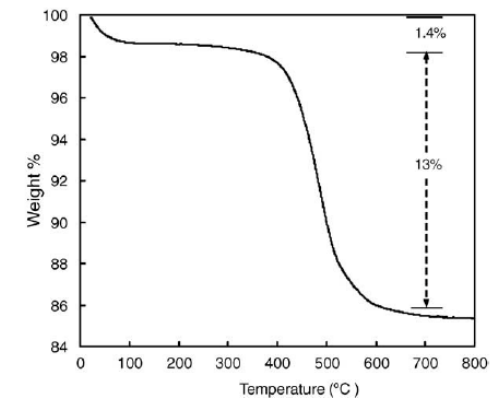
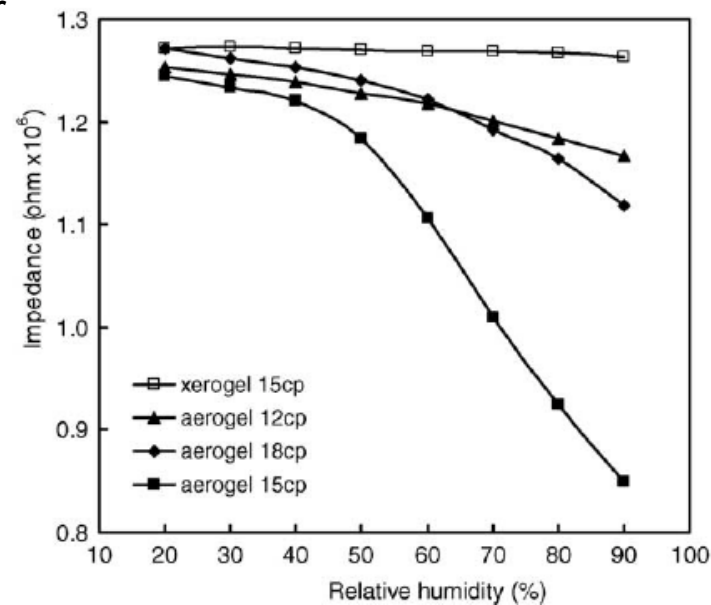
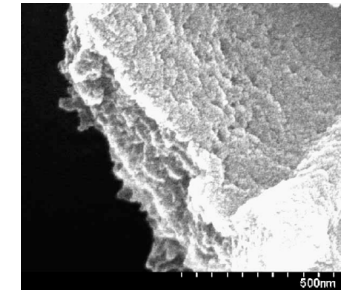
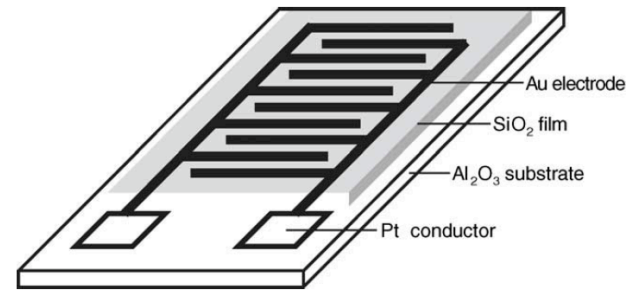
Ausnutzung der Fähigkeit von Aerogelen zur Absorption von Feuchtigkeit

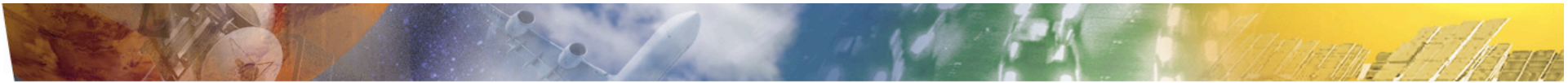
Messmethoden:

- Widerstandsänderung
- Kapazitätsänderung

Technik:

Dünner, überkritisch getrockneter Silica-Aerogelfilm bedampft mit Au-Drähten
(TEOS; alkalisch;
Spin coating;
SCD mit Propanol,
BET 866 m²/g);.





IR Detektoren

Grundidee:

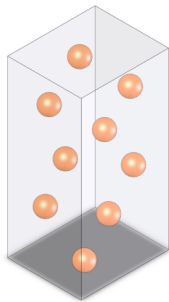
Einbettung ferroelektrischer Teilchen in Aerogele

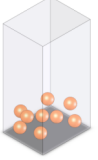
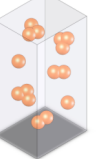
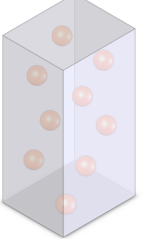
Nachweisprinzip:

Frequenzverdopplung

Technik:

Mischen von ferroelektrischen Pulvern (BaTiO_3 , KDP, LiNbO_3 , LiTaO_3) mit Aerogellösung; trocknen an Luft, oder überkritisch. Dünner Film ausreichend; Aerogel aus Wasserglas, TEOS oder TiO_2

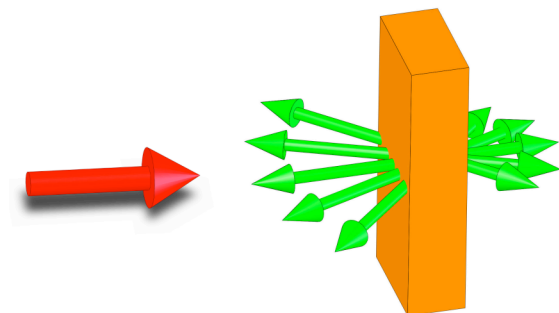
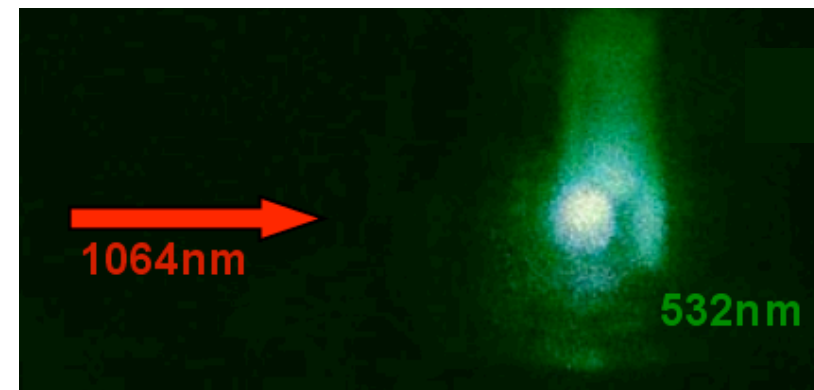
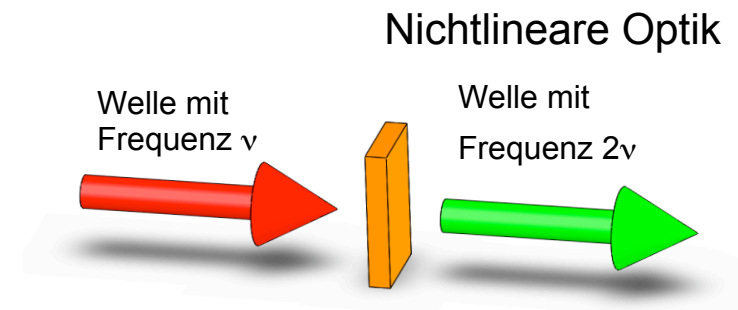
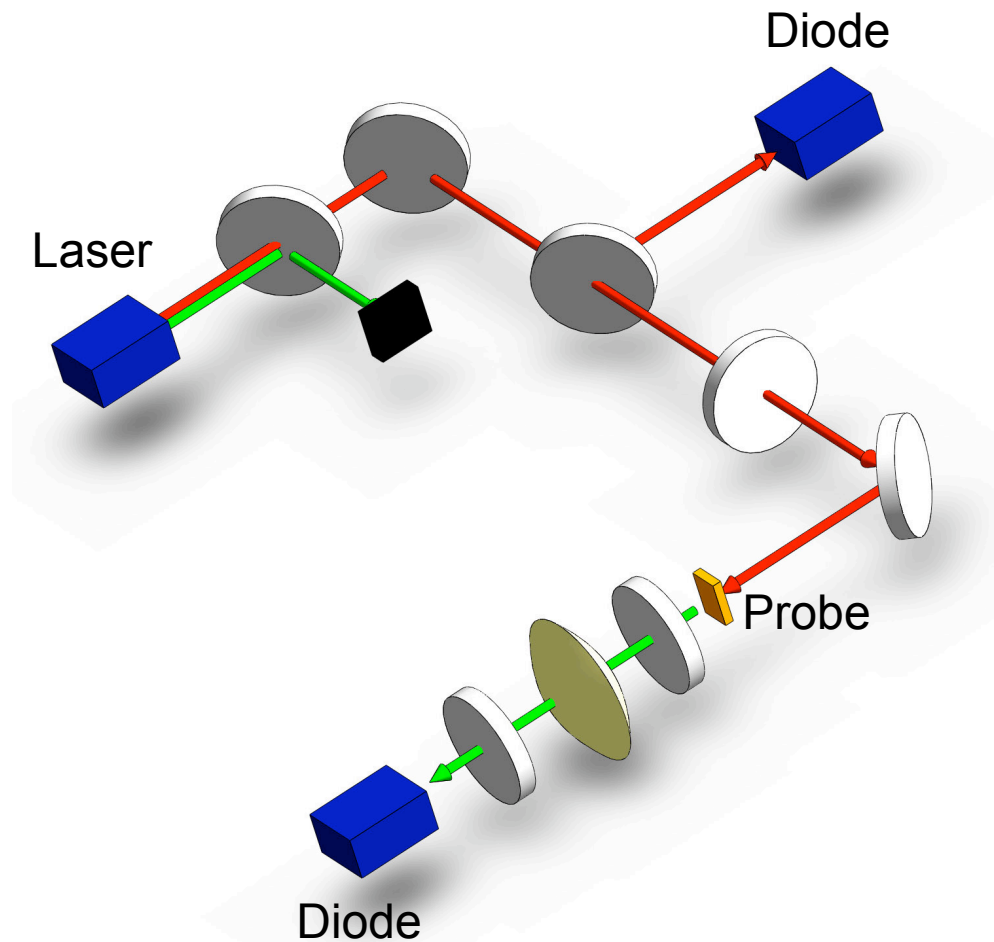


Fragen	Lösungen	
Sedimentation	Schnell gelierende Aerogele Mikrogravitation	
Agglomeration	Ultraschall Dispergiermittel Teilchengröße	
Trübung	Brechwertanpassung durch Titanoxid-Xerogele	

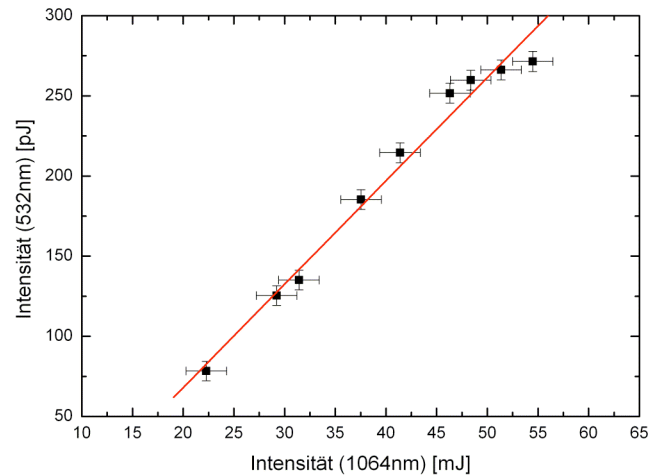


IR Detektoren :

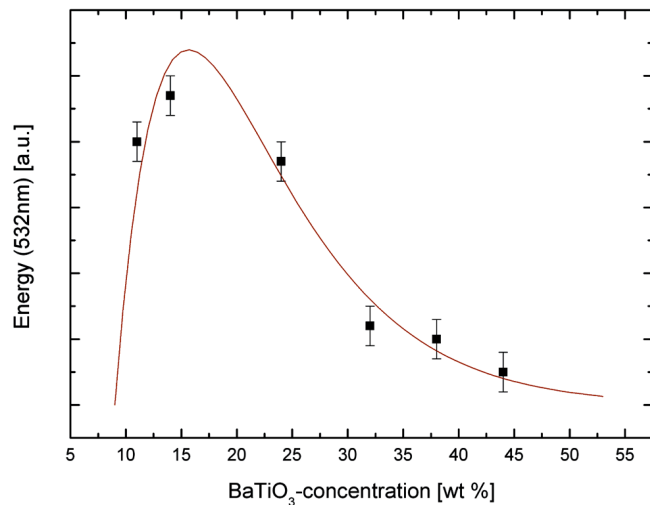
Frequenzverdopplung (Second Harmonic Generation)



IR Detektoren: Ergebnisse der SHG-Messungen



KNbO₃ 2μm



BaTiO₃ 1μm



Vorteil gegenüber konventionellen Viewern:

Stabilität, lange nutzbar, reaktivierbar

Strahlt grün in alle Raumrichtungen

Nachteil: teurer.



Giessereitechnik: Formstoffe

➤ Giessen von metallen in Formen benötigt Formstoff

➤ Formstoffe: Sande = Sandguss

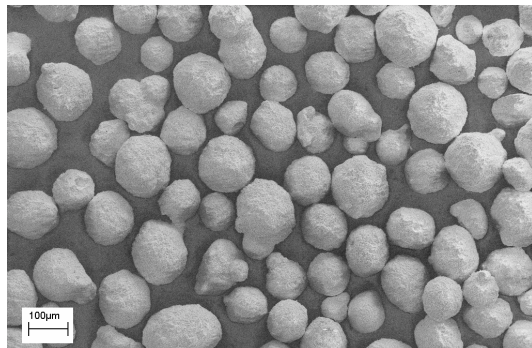
Metalle = Dauerformguss

Keramiken = Feinguss

Sande müssen gebunden werden!

Konventionell: Wasser (Sandburg), Öle, Polymere (Phenolharze, Polyurethan, Epoxyharze, Furanharze..) Wasserglas,...

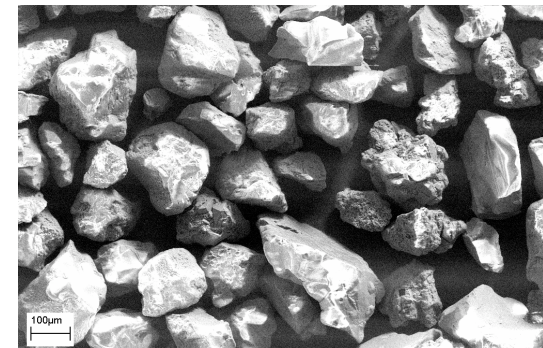
Neu: Bindemittel = RF Aerogel = AeroSand



Cerabeads



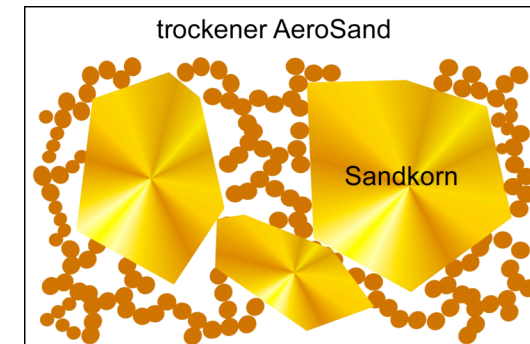
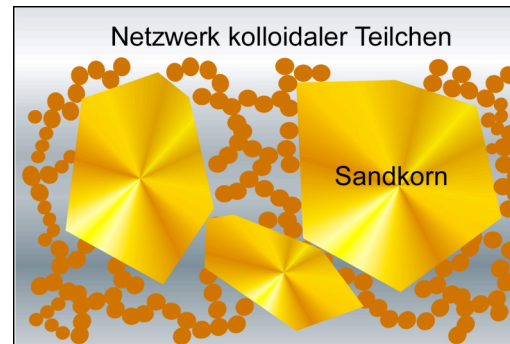
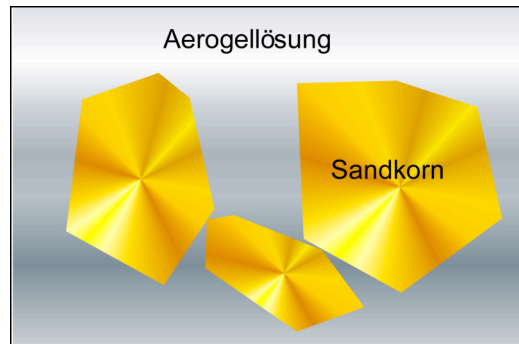
Korund



Quarzsand

AeroSande = Aerogel + Sand

- Giessereisande mit polymeren oder Kohlenstoff-Aerogel als Binder
- Sandtypen
 - Korund, Zirkon, Cerabeads, Min-Sand, Quarz, ...
- RF-Aerogel bzw. pyrolysiertes RF-Aerogel

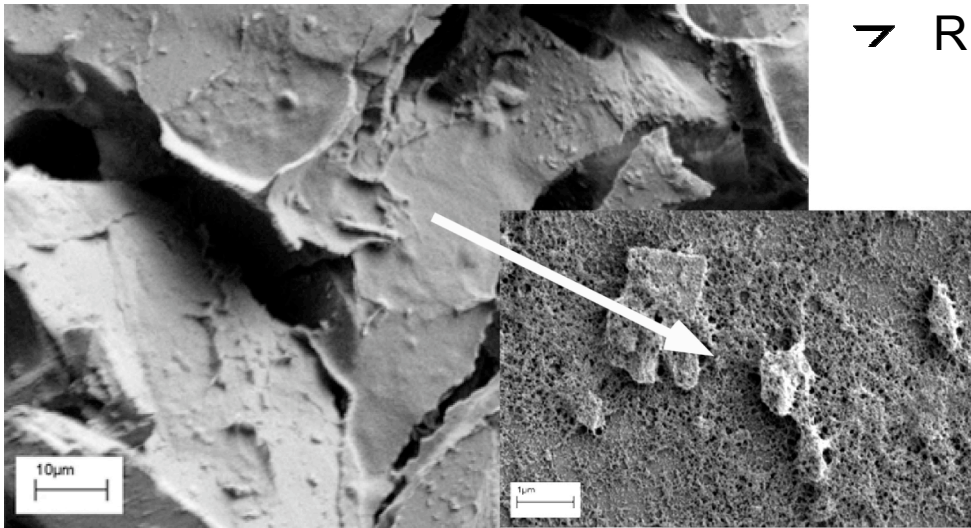


Technik:

Sol herstellen, Mischen mit Sand (ca. 10 Gew.%);

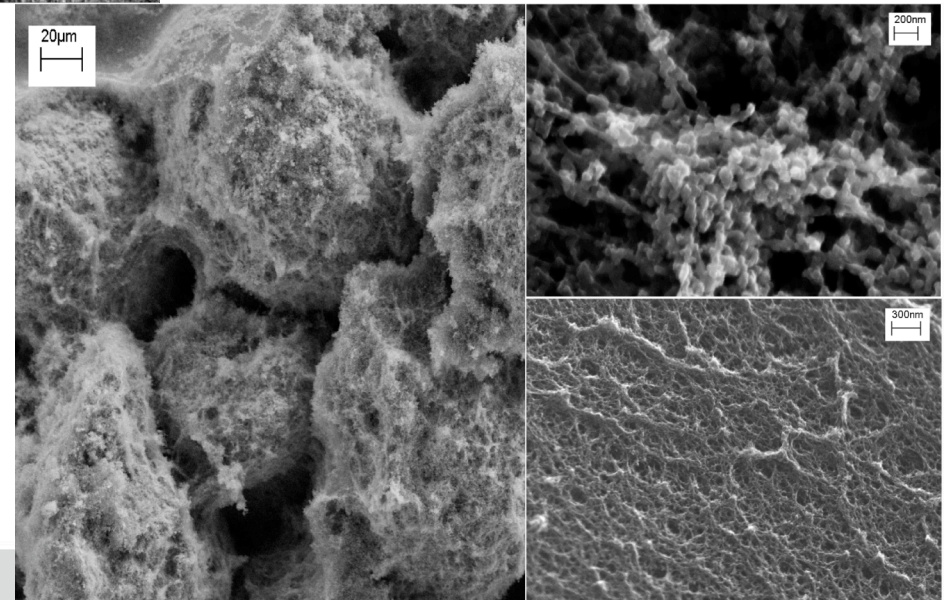
Kernschiessen (in eine Form schießen), unterkritisch trocknen; Fertig!

AeroSande - realer Aufbau



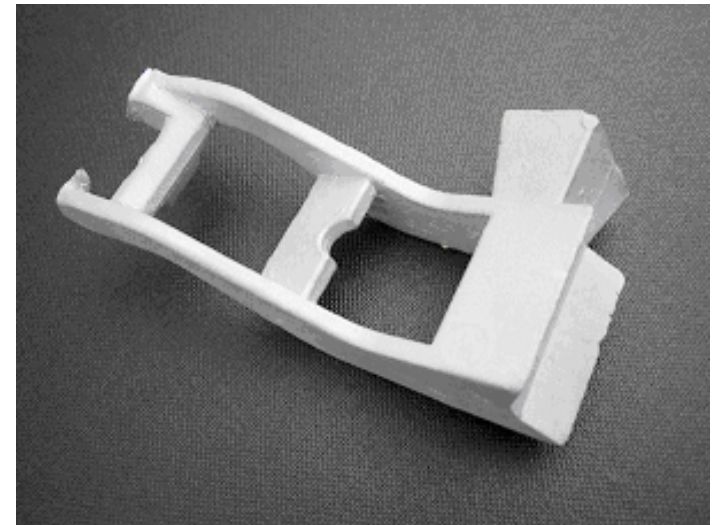
➤ RF-Aerogel mit Korundsand

➤ Kohlenstoff-Aerogel mit Korundsand



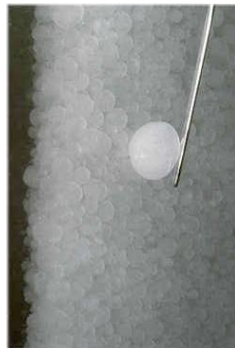
AeroSande - Eigenschaften

- leichte Entkernung
(thermisch zersetzbar $> 350^{\circ}\text{C}$)
- Wärmeleitfähigkeiten 0,3 - 2 W/Km
- gute Festigkeit
(100 bis 300 N/cm²)
- hohe Oberflächengüte
- keine messbare Schrumpfung
- 100% rezyklierbarer Sand
- Kein Gasstoss bei C-Aerosanden
- Kaum Gasentwicklung bei RF-Aerosanden (COGAS)
- Lagerfähigkeit (nicht Feuchtigkeitsempfindlich)



Syntaktische Verbundwerkstoffe mit Aerogelen

Aerogel filled metals:
mit nanostrukturierten Materialien gefüllte
metallische Legierungen

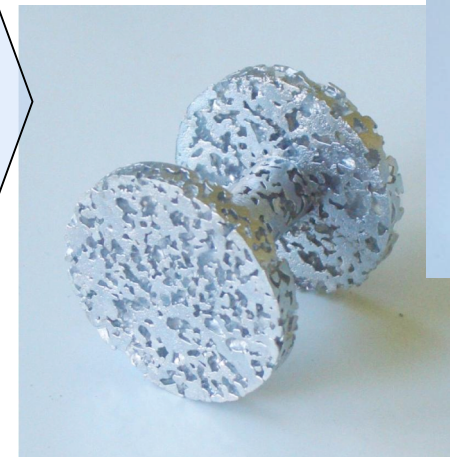
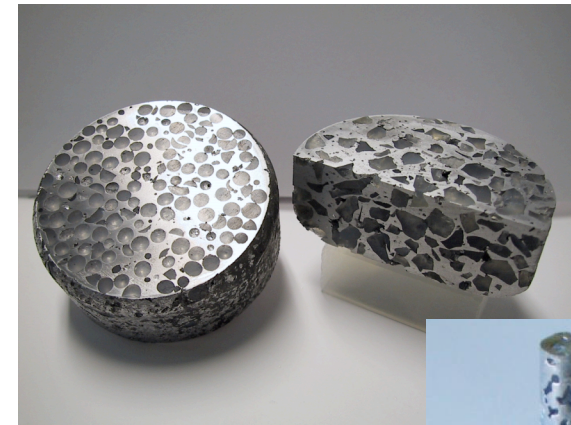


Füllmaterial



Legierung

Schleuderguss
Rheoguss
Kokillenguss
Niederdruckguss



AeroFims – Hochsteife, schallabsorbierende Werkstoffe für Fahrzeuge

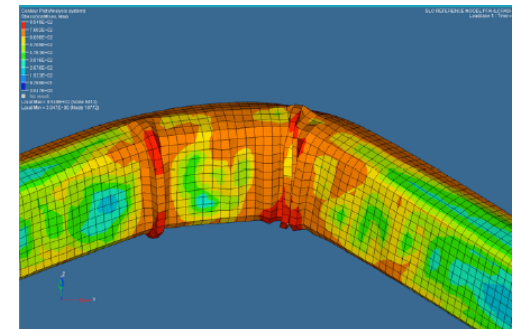
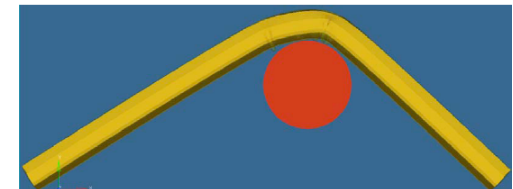
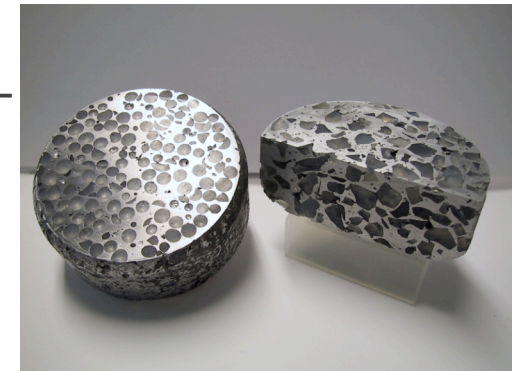
Ziel: Herstellung eines neuen Verbundwerkstoffes aus nanostrukturierten ultraleichten Granulaten und einer Al-Gusslegierung.

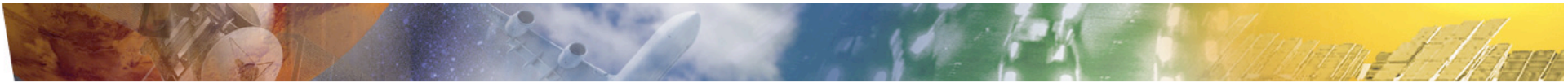
Eigenschaften (einstell- und anpassbar an Bauteilanforderungen):

- Geringe Dichte
- Hohe Festigkeit und Steifigkeit
- Hohe Dämmungs- und Dämpfungseigenschaften

Anwendungen: Konstruktionsmaterial für Fahrzeuge

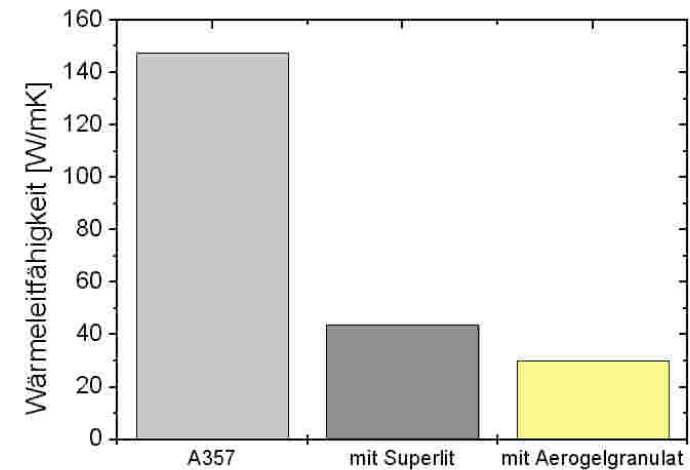
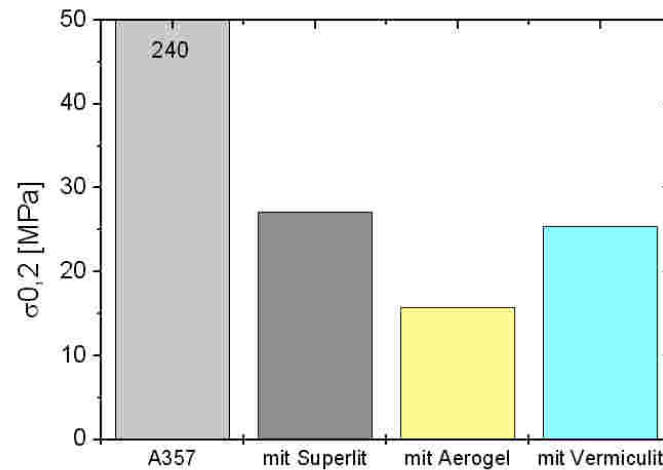
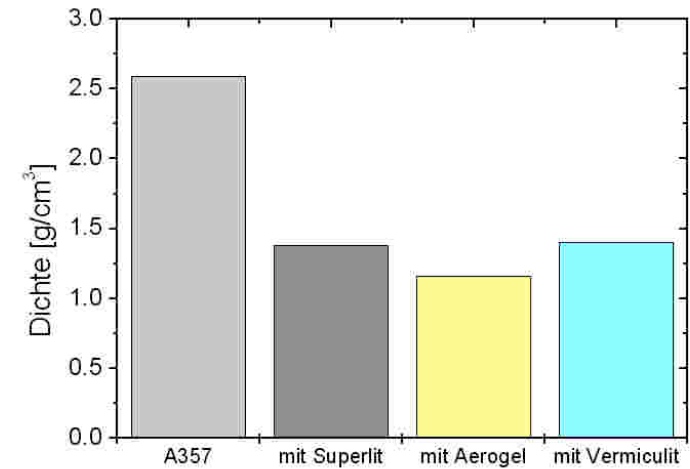
- Crash-Absorption
- Geräuschdämmung etc.

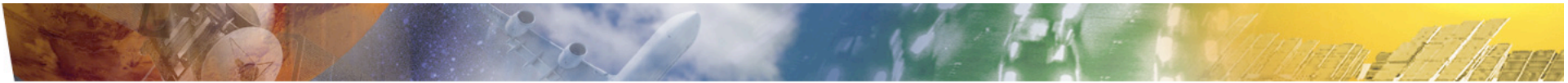




AeroFims - Eigenschaften

- Dichte 0,8 - 1,5 g/cm³
- Fließgrenze (Druck) 30 - 60 MPa
- Hohe Schalldämpfung
- Geringe Wärmeleitfähigkeit





Faserverbundwerkstoffe

RF-Aeromats:

Faserverbund RF-Aerogel mit Kurz- und Langfasern

RF-Aerogel als Matrixwerkstoff:

Vorteile:

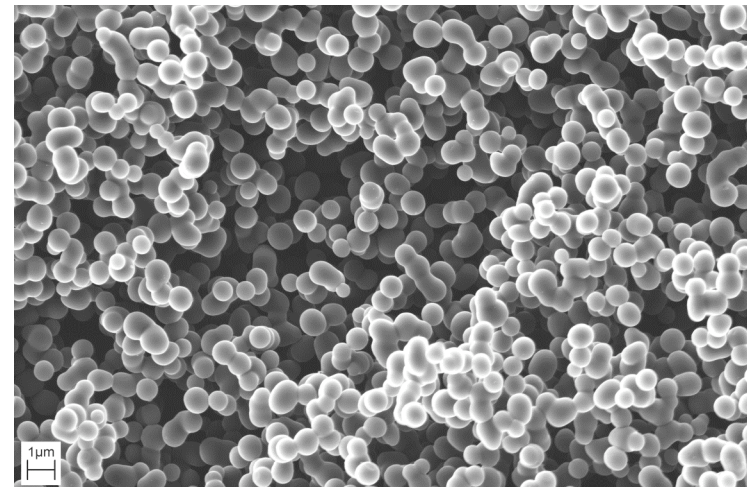
- Geringe Dichte
- Temperaturbeständigkeit
- Gute Wärmeisolation
- Gute Schallisolation

Nachteile:

- Spröder Werkstoff
- Geringe Festigkeit

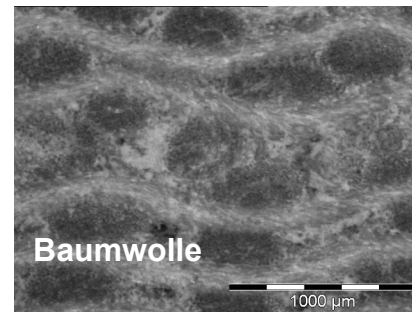
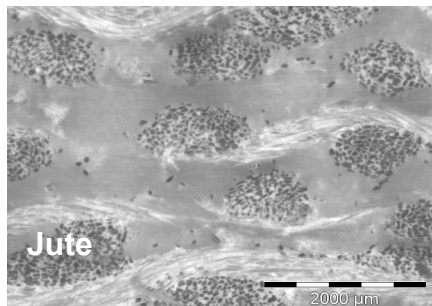
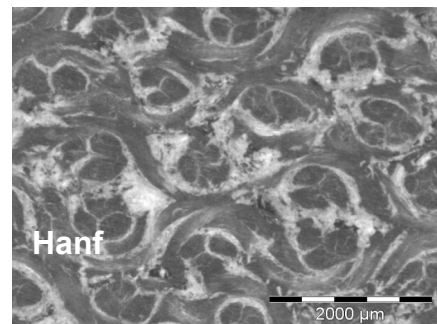
Fasern

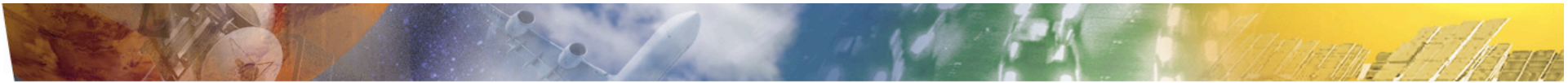
- Hanf
- Baumwolle
- Jute
- Kohlenstoff (Gewebe und Filz)
- Aramid/Kevlar



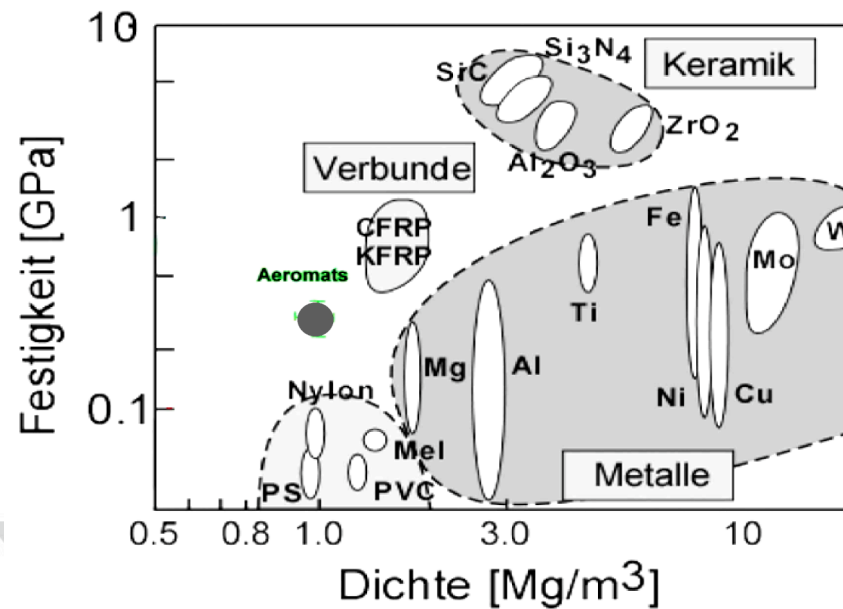
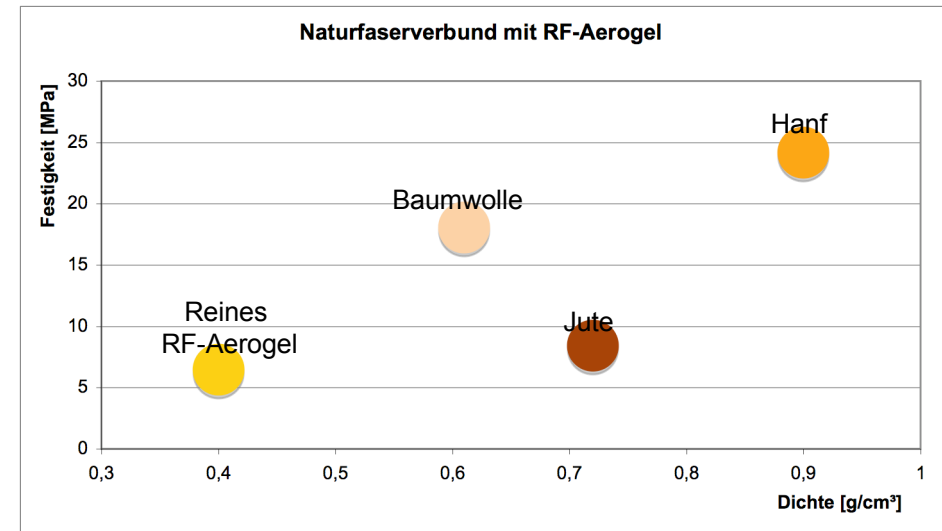
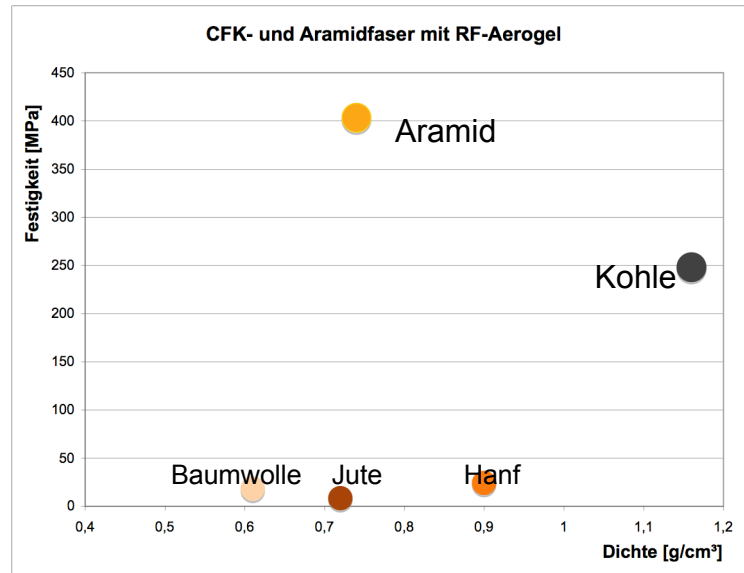
Herstellung der RF-Aeromats

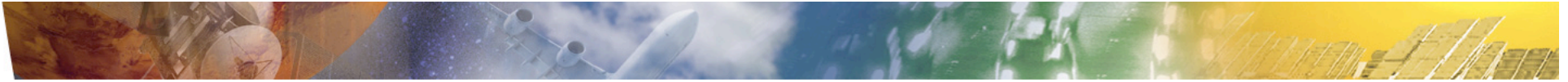
- Zuschnitt der Gewebe/Filze auf die geeignete Größe
- Behandlung der Gewebe mit RF-Aerogel
- Eindrapieren in die gewünschte Form
- Aerogellösung einfüllen
- Gelierung und Trocknung bei 40°-80 °C





Festigkeiten





Wissenschaftliche Anwendungen

Čerenkov Detektor

Prinzip: Bewegung eines geladenen Elementarteilchens in einem Medium mit einer Teilchengeschwindigkeit größer als die Lichtgeschwindigkeit des Mediums erzeugt Strahlung in Form eines "Mach-Kegels".

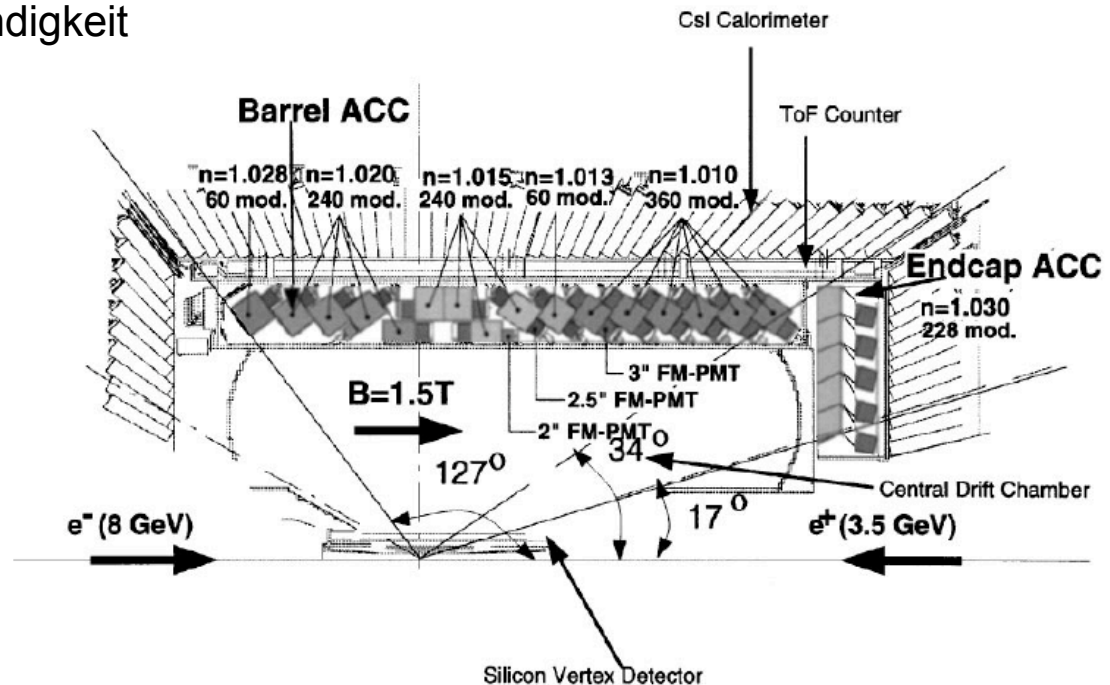
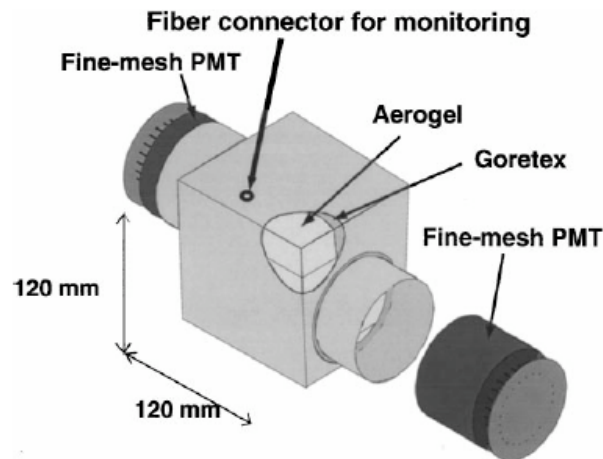
Ziele:

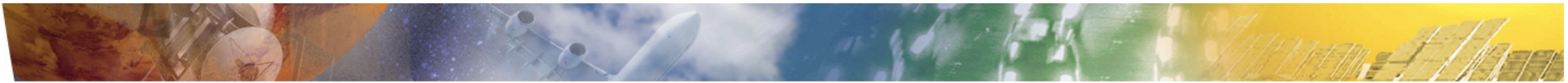
- Nachweis relativistischer Teilchen
- Messung der Teilchengeschwindigkeit
- Bahnvermessung

$$\cos(\theta_c) = \frac{c}{nv} = \frac{1}{\beta n}$$

$$n = 1 + k\rho$$

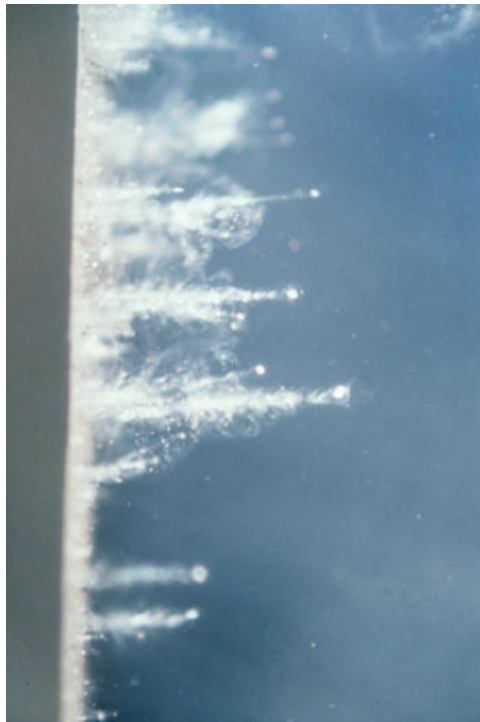
$$k \approx 0.19 - 0.21$$





Stardust - Staubdetektor

Prinzip: Aerogel zur Absorption der kinetischen Energie von interplanetarem, interstellarem oder kometarem Staub



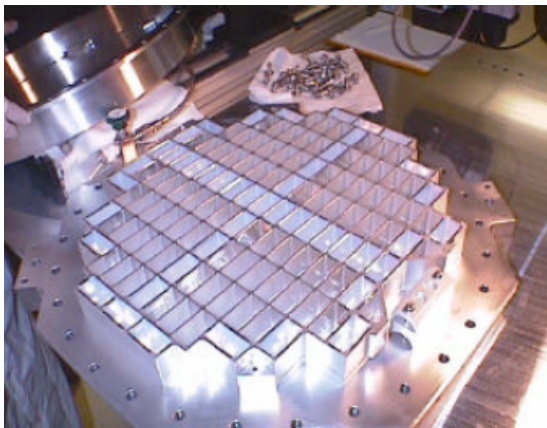
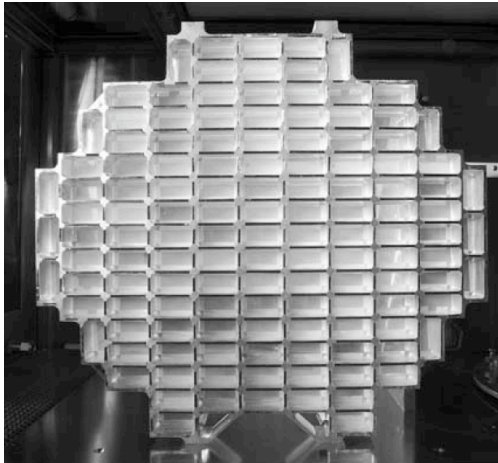
Stardust Mission:

- Start: Januar 1999
- Interstellaren Staub (IDP) sammeln
 - Sammlung A: Okt. 1999 bis März 2000
 - Sammlung B: Mai 2002 bis Okt. 2002
- Treffen mit Komet Wild2: Januar 2004
- Rückkehr zur Erde: Januar 2006

Teilchenspuren im Aerogel

Stardust - Staubdetektor

Aufbau:



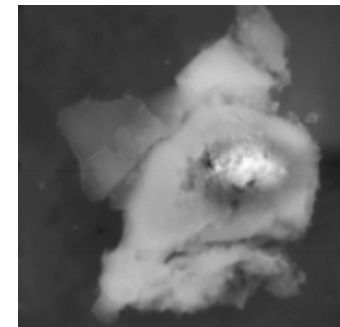
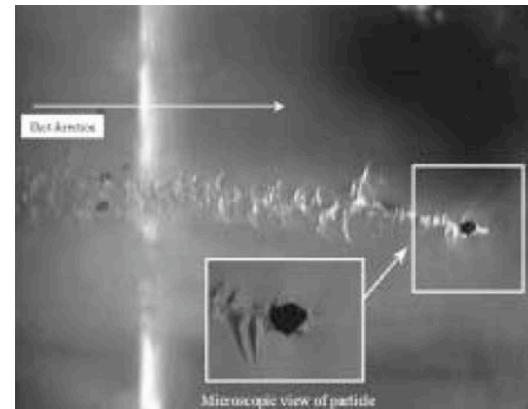
Anlage bestand aus zwei Gittern mit je
133 Zellen Rücken an Rücken
montiert

Kometenseite:

Zellmaße 4 x 2 x 3 cm;

für IDPs

Zellmaße 4x2x1 cm



LPSC XXXI
Houston, March
2000



Stardust - Staubdetektor

Aerogematerial: Entwickelt am JPL als Gradientenaerogel

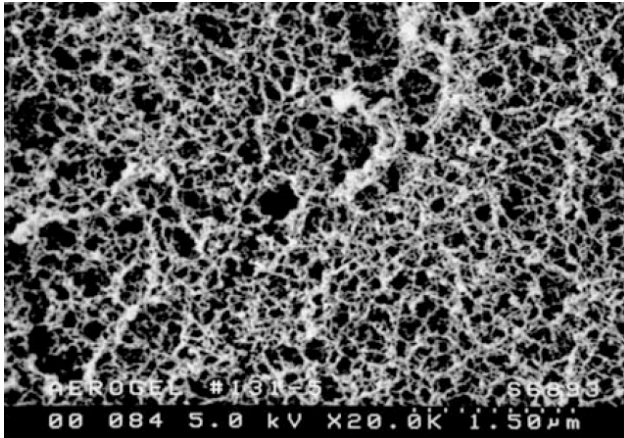


Auftreffseite: Dichte 0.01 g/cm^3

Rückseite: Dichte 0.05 g/cm^3

Materialien:

- TEOS
- Acetonitril
- Wasser
- Ammoniumhydroxid



Gradienten durch Überschichtung der Sole (Guß)
Überkritische Trocknung



Aerogele für die Erstarrungsforschung

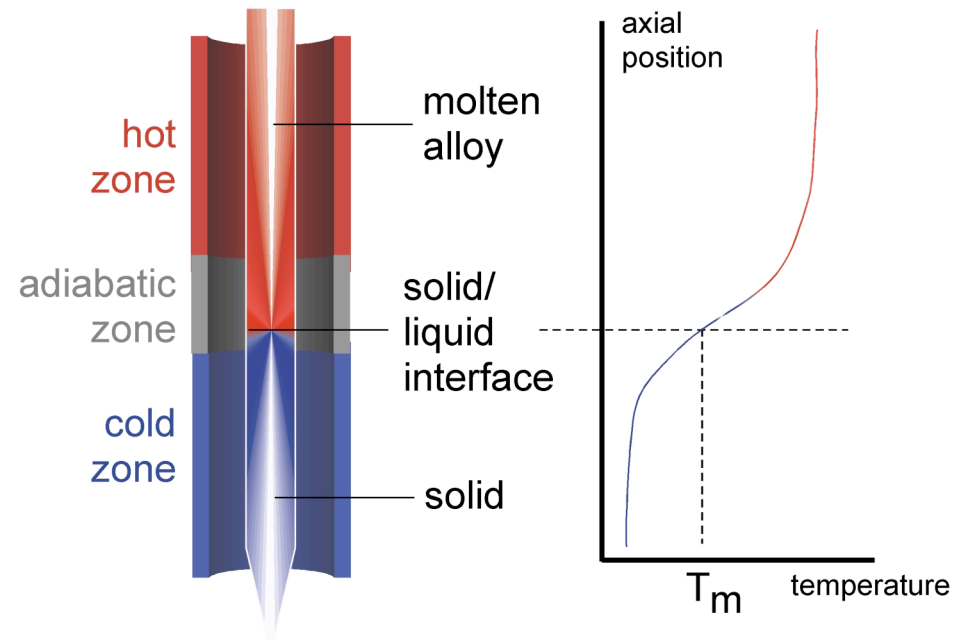
Klassisches Konzept: Bridgman-Ofen

mit

- beweglicher Probe oder
- beweglichem Ofen

Charakteristika:

- festes Ofentemperaturprofil
- Probe mit Tiegel
- Tiegel transportiert Wärme ($\lambda_{\text{Tiegel}} \neq \lambda_{\text{Probe}}$)
- Temperaturregistrierung durch Thermoelemente in der Probe oder im Tiegel



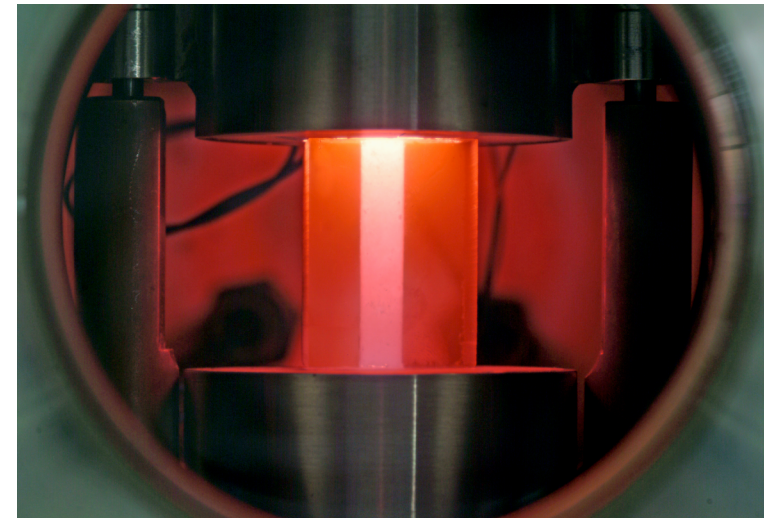
Annahme:

Stationärer Zustand (Konzentrations- und Temperaturfeld) kann erreicht werden:

Ziehgeschwindigkeit = Erstarrungsgeschwindigkeit

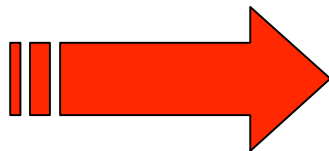
Alternatives Konzept: ARTEMIS

AeRogelTEchnology for Microgravity Solidification



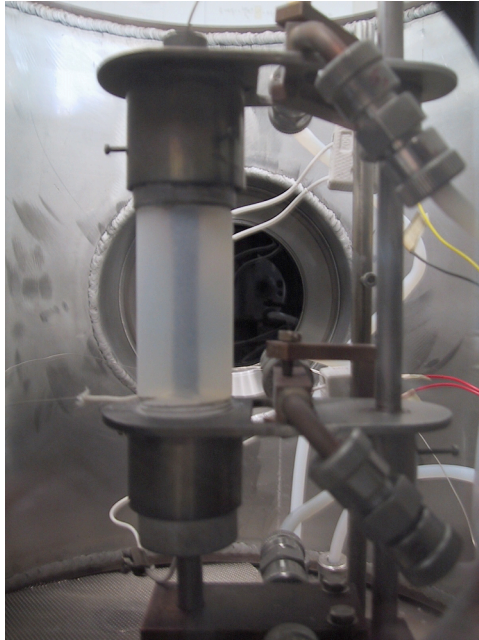
Nutzung von Aerogelen als

- Tiegel bzw. als „tiegelfreie“ Umhüllung
- nahezu perfekt adiabatische Zone
- optische Messung des Erstarrungsprozesses:
 - Temperatur
 - v und G und
 - fraction solid f_s und anderes

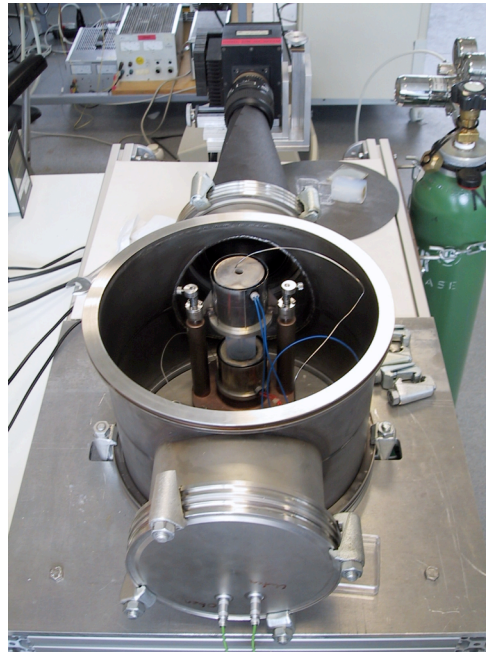


Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

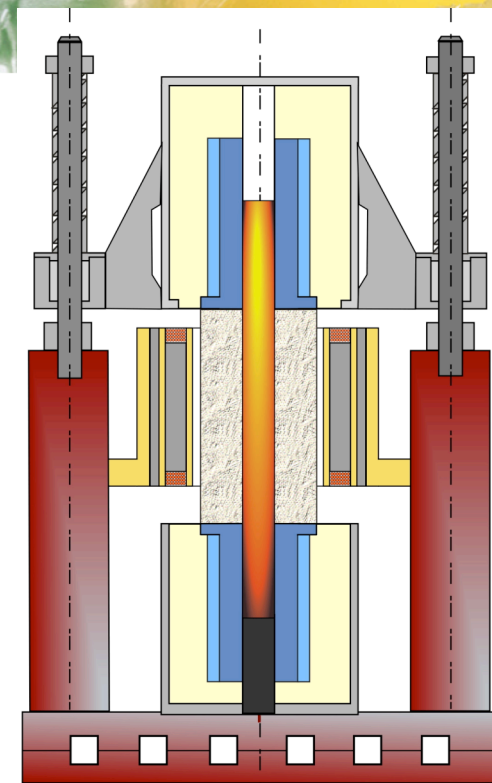
ARTEMIS Realisierungen



ARTEMIS I 1995



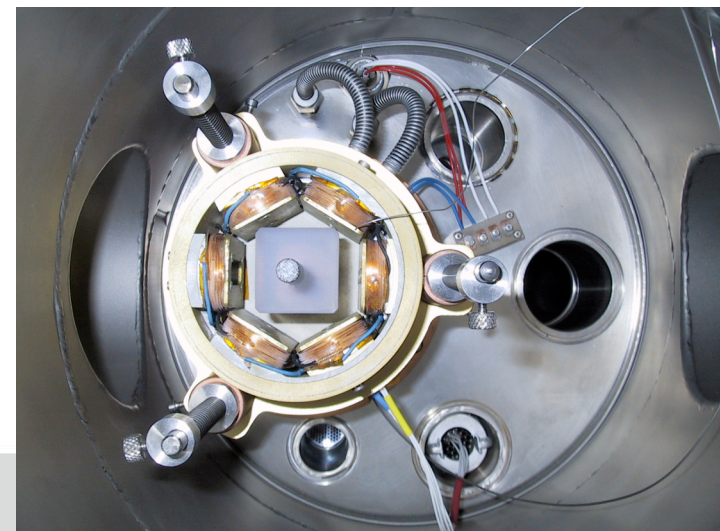
ARTEMIS II 2000



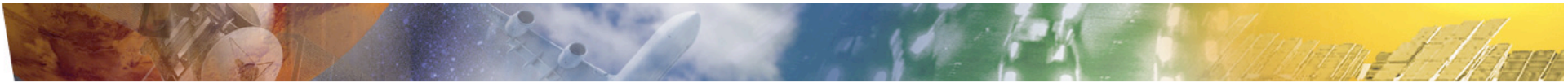
ARTEMIS III 2002

unterschiedliche NIR-Zeilen CCD cameras:

ARTEMIS I	450 - 1200 nm; 1783 Pixel
ARTEMIS II	700 - 1700 nm; 256 Pixel
ARTEMIS III	965 - 2550 nm; 256 Pixel

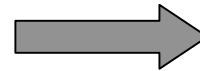
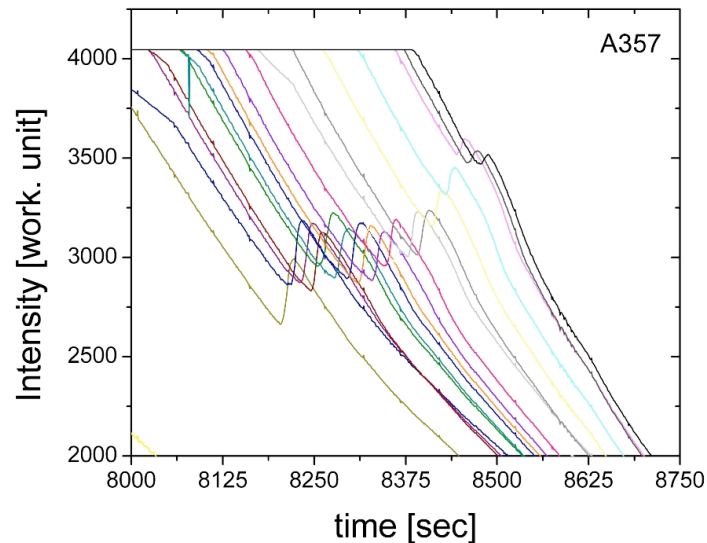


Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

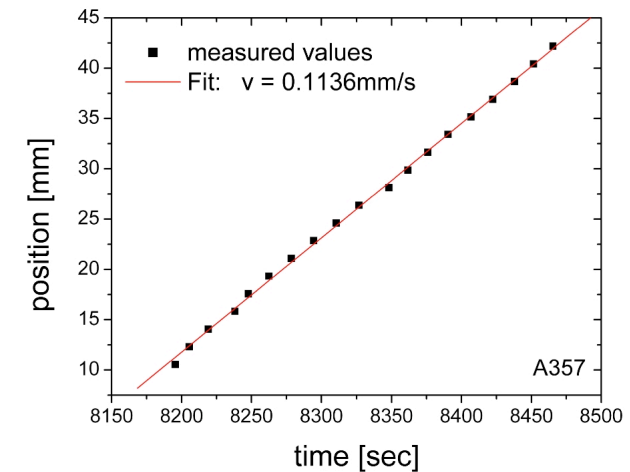


Optische Messung in ARTEMIS

Phasenumwandlungen bedeuten eine Änderung der Emissivität
=> Änderung der Intensität



Jedes Pixel
korrespondiert
zu einer Position
auf der Oberfläche
der Probe



Eigenschaften der ARTEMIS Öfen

- Erstarrungsgeschwindigkeit: 100 nm/s bis 400 μ m/s
- Temperaturgradient < 60 K/cm
- Probenlängen: 60 bis 140 mm
- Probendurchmesser: 8 mm
- Maximale Temperatur (über 24 h): 900 °C
- optische Ortsauflösung 0,125 mm
- flache Isothermen (maximale Durchbiegung 20 μ m)
- Rotierendes Magnetfeld: 0 . 6 mT bei 50 Hz
- PID-Kontrolle der Erstarrung (LabView)
- Vakuum oder Inertgas



ARTEX – AeRogel technology on TEXus



05 / 2001

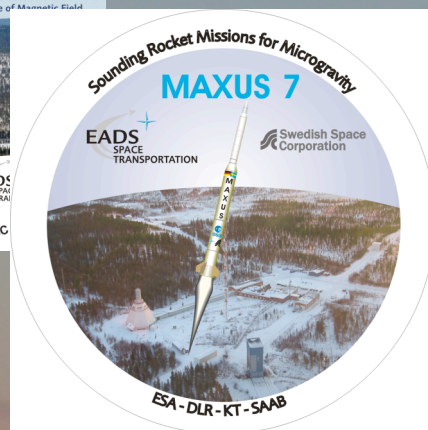
ARTEX



12 / 2004

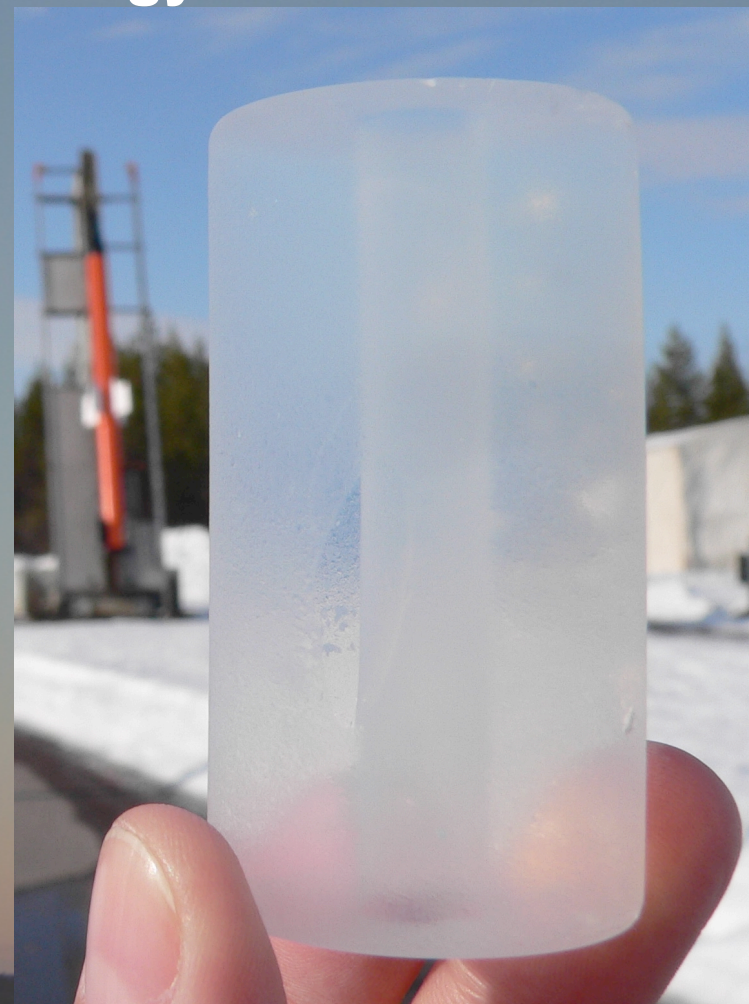
ARTEXplus

(with RMF)

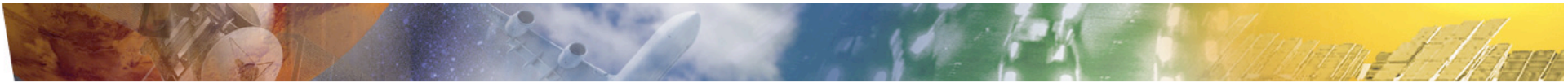


05 / 2006

ARTEX &
ARTEXplus



Sample material: Al-6 wt.% Si



Aerogele - Werkstoffe mit Anwendungspotenzial

„The global market for aerogels is expected to grow up from \$62 Million in 2006 (700t) to \$951 Million in 2011 (12,679t).“

JOM 58 (August 2006) 10-11

